



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

**Estudo da influência da forma dos detritos nas
cavidades de erosão junto de pilares de pontes
através do FLOW-3D**
Versão final após defesa

Inês Sofia Pereira Mendonça

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof.^a Doutora Cristina Maria Sena Fael

Covilhã, dezembro de 2018

Em memória da minha avó Adriana.

AGRADECIMENTOS

Vou começar por agradecer à professora Cristina Fael pelo voto de confiança que me concedeu há um ano atrás, pela sua excelente orientação desta dissertação, pelo apoio contínuo e pelas palavras amigas. Todo o seu apoio e ensinamentos ajudaram-me a crescer enquanto estudante.

Ao Hugo Canilho agradeço por me ter ajudado, de forma incondicional, nos meus primeiros passos no *FLOW-3D*, bem como pelas horas despendidas no desenvolvimento dos primeiros modelos numéricos. A sua experiência em modelação numérica foi fundamental e indispensável à realização desta dissertação.

Um agradecimento muito especial ao meu namorado, Ricardo Tenreiro companheiro de todas horas, pelo apoio incondicional, pelas suas palavras de conforto, pelo abraço reconfortante, pela amizade, apenas pelo facto de existir na minha vida e poder sempre contar com o seu apoio, não só na realização deste trabalho, mas em tudo na minha vida. Que o futuro nos permita realizar tudo aquilo que sonhamos. Queria agradecer também aos pais do Ricardo por me aturarem em tantas viagens da Guarda para a Covilhã, um muito obrigado por todo o apoio.

Por fim o maior agradecimento não podia deixar de ser à minha família, que tanto me incentivaram na conclusão desta dissertação, sem eles nada seria possível, aos meus amigos de longa data, aos colegas de curso obrigado por todo o apoio prestado.

RESUMO

Frequentemente as pontes possuem fundações inseridas no leito dos rios constituído por material aluvionar. Em consequência, ficam sujeitas aos processos erosivos que se desenvolvem junto destas, aspeto que se agrava durante a ocorrência de cheias, por um lado, devido ao aumento de caudais e por outro, devido ao aumento dos detritos transportados pelo escoamento, que se acumulam junto aos elementos estruturais das pontes. Os detritos, maioritariamente materiais lenhosos flutuantes, podem levar à obstrução parcial dos seus vãos ou à acumulação juntos aos seus pilares e apresentam consequências em termos de redução de capacidade de vazão e de alteração da morfologia das cavidades de erosão, respetivamente. A dimensão, a forma e a localização dos detritos são características que devem ser consideradas na previsão da profundidade das cavidades de erosão.

O presente estudo, dando valor ao avanço que as tecnologias proporcionam através da modelação numérica, pretende contribuir para alargar o conhecimento sobre a influência que os detritos têm na profundidade das cavidades de erosão junto de pilares cilíndricos, para escoamentos sem transporte sólido generalizado, recorrendo para o efeito ao programa FLOW-3D.

Neste âmbito, foi realizada a modelação numérica do canal hidráulico existente no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas da Universidade da Beira Interior. A primeira fase do trabalho teve como objetivo calibrar o modelo computacional com o modelo experimental e validar os resultados obtidos pela simulação numérica; a segunda fase visou analisar o impacto causado pelos detritos nas cavidades de erosão. Para isso, foram realizadas 5 simulações: a primeira para um pilar isolado, sem a presença de detritos, e as seguintes com a presença de detritos nas suas formas mais comuns, triangular e retangular.

Os resultados obtidos através do FLOW-3D permitiram constatar que os detritos simulados com a caixa retangular flutuante origina maior profundidade máxima da cavidade de erosão e que os detritos simulados com a caixa triangular no fundo foi a que apresentou menor profundidade máxima da cavidade de erosão, tal como verificado em ensaios experimentais. No entanto, os resultados obtidos através do *FLOW-3D* são significativamente inferiores aos obtidos experimentalmente, $\approx 30\%$.

Palavras-chave

Software FLOW-3D, Modelação numérica, Detritos, Pilar cilíndrico, Erosões localizadas.

ABSTRACT

Frequently the bridges have foundations inserted in riverbeds constituted by alluvial material. As a consequence, they are subject to the erosive processes that take place next to them, aspect that is aggravated during the occurrence of floods, on one hand, due to the increase of the flow and on the other, due to the increase of the debris carried by the flow, that accumulate together of the bridge structural elements. The debris, mainly floating woody materials, can lead to the partial obstruction of their spans or accumulation near their bridge piers and have consequences in terms of reduction of flow capacity and alteration of the morphology of scour hole, respectively. The dimensions, shape and location of the debris are characteristics that must be considered when predicting the scour hole depth.

The present study, giving value to the advances that the technologies provide through numerical modelling, intends to contribute to extend the knowledge about the influence that the debris has on the scour depth near cylindrical piers, under clear-water flow conditions, using the FLOW-3D program.

In this context, the numerical modelling of the hydraulic channel existing in the Fluvial Hydraulics and Structures Laboratory of the University of Beira Interior was carried out. The first phase of the work had as objective to calibrate the computational with the experimental model and to validate the results obtained by the numerical simulation; the second phase aimed to analyse the impact caused by the debris in the scour cavities. For this, 5 simulations were performed: the first for an isolated pier, without the presence of debris, and the following with the presence of debris in its most common forms, triangular and rectangular.

The results obtained through FLOW-3D showed that the debris simulated with the floating rectangular box causes a greater maximum scour depth and the debris simulated with the triangular box in the bottom was the one that presented smaller scour depth, as verified in experimental tests. However, the results obtained through FLOW-3D are significantly lower than those obtained experimentally, 30 %.

Keywords

FLOW-3D software, Numerical modelling, Debris, Cylindrical pier, Local scour.

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Organização do trabalho desenvolvido.....	2
CAPÍTULO 2 - Erosões localizadas junto de pilares	5
2.1 Introdução	5
2.2 Erosões localizadas junto de pilares isolados.....	6
2.3 Efeito dos detritos nas cavidades de erosão	13
2.3 Equações de cálculo da profundidade máxima de cavidades de erosão	17
2.3.1 Método de Melville e Coleman (2000)	17
2.3.2 Método de Richardson e Davis, 2001	21
2.3.3 Equação proposta por Melville e Dongol (1992) para o efeito dos detritos na cavidade de erosão	22
CAPÍTULO 3 - Modelação numérica	25
3.1 Introdução	25
3.2 Equações governativas	27
3.3 Modelos de turbulência	28
Modelo k- ϵ RNG (renormalizado)	30
3.4 Modelação numérica em FLOW-3D.....	32
3.4.1 Método dos volumes finitos	33
3.4.2 Método Volume of Fluid (VOF).....	34
3.4.3 Malha de Cálculo	35
3.4.4 Método FAVOR™.....	36
3.4.5 Condições iniciais e de fronteira	38
CAPÍTULO 4 - Procedimento numérico	41
4.1 Introdução	41
4.2 Características do processo de simulação	41
CAPÍTULO 5 - Análise e discussão de resultados	55
5.1 Introdução	55
5.2 Validação do modelo computacional	55
5.3 Simulações numéricas.....	60
5.3.1 Simulação 1	60
5.3.2 Simulação 2	62
5.3.3 Simulação 3	63
5.3.4 Simulação 4	64
5.3.5 Simulação 5	65
5.4 Evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão	67
CAPÍTULO 6 - Considerações finais	77
6.1 Conclusões	77

6.2 Trabalhos Futuros	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Alteração do campo de pressões do escoamento a montante de um pilar (Fael, 2007)	7
Figura 2.2 - Estrutura do escoamento junto de um pilar (adaptado de Couto e Cardoso, 2001)	7
Figura 2.3 - Evolução temporal da profundidade de cavidades de erosão com e sem transporte sólido generalizado (adaptado de Fael, 2007)	9
Figura 2.4 - Fases do processo erosivo (Couto e Cardoso, 2001)	10
Figura 2.5 - Variação da profundidade de erosão local com intensidade do escoamento (adaptado de Melville e Coleman, 2000)	11
Figura 2.6 - Variação da profundidade de erosão com a dimensão do sedimento (adaptado de Melville e Coleman, 2000)	11
Figura 2.7 - Variação da profundidade de erosão com o alinhamento do pilar (adaptado de Melville e Coleman, 2000)	12
Figura 2.8 - Acumulação de troncos (adaptado de Zevenbergen <i>et. al.</i> , 2007)	15
Figura 2.9 - Forma retangular: a) Vista para jusante; b) Perfil longitudinal (adaptado de Lagasse <i>et al.</i> 2010)	15
Figura 2.10 - Forma triangular/cónica: a) Vista para jusante; b) Perfil longitudinal (adaptado de Lagasse <i>et al.</i> 2010)	16
Figura 2.11 - Padrão de escoamento junto ao pilar na presença de aglomerados de detritos: a) retangulares; b) triangulares (adaptado de Lagasse <i>et al.</i> 2010)	16
Figura 2.12 - Formas de pilares correntemente utilizados (adaptado de Melville e Coleman, 2000)	20
Figura 2.13 - a) Desenho esquemático com as dimensões dos detritos; b) variação da profundidade de erosão com a dimensão dos detritos flutuantes (Adaptado de Melville e Coleman (2000)	24
Figura 3.1 - Descarregador de cheia (Brethour and Burnham, 2010)	25
Figura 3.2 - Resultado da simulação da cavidade de erosão após 3 horas de simulação (Zhao <i>et al.</i> , 2010)	26

Figura 3.3 - Grau de modelação e custo computacional de modelos de turbulência (adaptado de Rezende, 2009)	30
Figura 3.4 - Localização das variáveis numa célula de calculo (Flow 3D Documentation, 2016)	33
Figura 3.5 - Exemplo da distribuição da função F perto da superfície livre (Nunes, 2017)	35
Figura 3.6 - Malha de células de calculo: a)bi; b) tri-dimensional (adaptado de Bakker, 2006a)	36
Figura 3.7 - a) Definição do objeto; b) objeto criado (Flow 3D Documentatio, 2016)	37
Figura 4.1 - Fluxograma do método numérico	42
Figura 4.2 - New Workspace (FLOW 3D Documentation, 2016)	42
Figura 4.3 - Configurações gerais (FLOW 3D Documentation, 2016)	43
Figura 4.4 - Ponto Física (FLOW 3D Documentation, 2016)	44
Figura 4.5 - Avaliação da densidade (FLOW 3D Documentation, 2016)	44
Figura 4.6 - Gravidade. (FLOW 3D Documentation, 2016)	44
Figura 4.7 - Viscosidade e turbulência (FLOW 3D Documentation, 2016)	45
Figura 4.8 - Definição do sedimento (FLOW 3D Documentation, 2016)	46
Figura 4.9 - Definição do fluido (FLOW 3D Documentation, 2016)	46
Figura 4.10 - Descrição do ponto Malha e Geometria (FLOW 3D Documentation, 2016)	47
Figura 4.11 - Geometria (FLOW 3D Documentation, 2016)	48
Figura 4.12 - Desenho esquemático do canal.....	48
Figura 4.13 - a) Caixa de detritos de forma triangular Flow-3D; b) Caixa de detritos triangular real (Dias, 2018)	48
Figura 4.14 - a) Caixa de detritos de forma retangular FLOW-3D; b) Caixa de detritos retangular real (Dias, 2018)	49
Figura 4.15 - Definição da malha (FLOW 3D Documentation, 2016)	49
Figura 4.16 - Malha (FLOW 3D Documentation, 2016)	50
Figura 4.17 - X mínimo (FLOW 3D Documentation, 2016)	51

Figura 4.18 - X máximo (FLOW 3D Documentation, 2016)	51
Figura 4.19 - Z máximo (FLOW 3D Documentation, 2016)	51
Figura 4.20 - Condições iniciais (FLOW 3D Documentation, 2016)	52
Figura 4.21 - Intervalo de dados (FLOW 3D Documentation, 2016)	52
Figura 4.22 - Executar simulação (FLOW 3D Documentation, 2016)	53
Figura 5.1 - Vista geral do canal (Robalo, 2014)	56
Figura 5.2 - Elemento cilíndrico (Robalo, 2014)	56
Figura 5.3 - Esquema tridimensional com a identificação das secções transversais (Robalo, 2014)	57
Figura 5.4 - Campo de velocidades médias	57
Figura 5.5 - Distribuição vertical da velocidade média do escoamento, secção de centro (Robalo, 2014)	58
Figura 5.6 - Comparação entre o perfil vertical da velocidade média do escoamento	59
Figura 5.7 - Comparação entre o perfil vertical da velocidade média do escoamento com malha diferente	60
Figura 5.8 - Resultados - Pilar isolado: a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal.....	61
Figura 5.9 - Resultados - Pilar Isolado Campo de velocidades médias	62
Figura 5.10 - Resultados - Caixa triangular flutuante a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal	62
Figura 5.11 - Resultados - Caixa triangular flutuante Campo de velocidades médias	63
Figura 5.12 - Resultados - Caixa triangular no fundo a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal.	64
Figura 5.13 - Resultados - Caixa triangular no fundo Campo de velocidades médias	64
Figura 5.14 - Resultados - Caixa retangular flutuante a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal	65
Figura 5.15 - Resultados - Caixa retangular flutuante Campo de velocidades médias	65
Figura 5.16 - Resultados - Caixa retangular no fundo a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal	66
Figura 5.17 - Resultados - Caixa retangular no fundo: Campo de velocidades médias.....	66

Figura 5.18 - Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão nas diferentes simulações (t = 4 horas)	67
Figura 5.19 - Resultados - Pilar Isolado: Imagem final da cavidade de erosão.....	68
Figura 5.20 - Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Pilar isolado	69
Figura 5.21 - Resultados - Caixa triangular flutuante: Imagem final da cavidade de erosão...	69
Figura 5.22 - Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Caixa triangular superfície	70
Figura 5.23 - Resultados - Caixa triangular: Imagem final da cavidade de erosão.....	70
Figura 5.24 - Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Caixa triangular no fundo.....	71
Figura 5.25 - Resultados - Caixa retangular flutuante: Imagem final da cavidade de erosão..	71
Figura 5.26 - Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Caixa retangular na superfície.....	72
Figura 5.27 - Resultados - Caixa retangular no fundo: Imagem final da cavidade de erosão...	72
Figura 5.28 - Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Caixa retangular no fundo	73
Figura 5.29 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Pilar isolado.....	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores do fator K_f para diferentes geometrias do pilar.....	20
Tabela 2.2 - Valores do fator do coeficiente do ângulo de incidência do escoamento.....	22
Tabela 2.3 - Valores do fator K_{cf} para diferentes configurações de fundo.....	22
Tabela 4.1 Condições de fronteira.....	50
Tabela 5.1 Condições experimentais	57
Tabela 5.2 Comparação das velocidades obtidas na análise experimental e na análise numérica	59
Tabela 5.3 Comparação dos valores de U_c e respectivos caudais.....	74

SIGLAS E ACRÓNIMOS

CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
EUA	Estados Unidos da América
HEC	Hydraulic Engineering Circular
LDV	Sistema 3D de Velocimetria Doppler Laser (em terminologia inglesa - Laser Doppler Velocimeter)
LES	Large Eddy Simulation
MVF	Método dos Volumes Finitos
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
VOF	Volume of Fluid
VC	Volume de Controlo

SIMBOLOGIA

Símbolo	Descrição
∇	Operador nabla
a	Comprimento do pilar
b	Largura do pilar
B	Largura do canal
b_d	Diâmetro dos detritos; Largura dos detritos
b_e	Diâmetro equivalente do pilar
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	Parâmetros do modelo de turbulência
C_μ	Constante empírica especificada no modelo de turbulência
d_i	Diâmetro
D_{50}	Diâmetro mediano do material do fundo
D_p	Diâmetro do pilar cilíndrico
f	Forças de massa
F_{vol}	Volume de fluido no método VOF
Fr	Número de Froude do escoamento de aproximação = U/\sqrt{gh}
g	Aceleração da gravidade
G_b	Produção de energia cinética devido às flutuações
G_k	Produção de energia cinética turbulenta
h	Altura do escoamento de aproximação não perturbado
h_s	Profundidade da cavidade de erosão num dado instante
h_{se}	Profundidade de equilíbrio das cavidades de erosão
J	Perda de carga unitária
k	Energia cinética turbulenta
K_{cf}	Coefficiente de configuração de fundo
K_D	Fator que traduz a influência da granulometria do material do fundo
K_e	Coefficiente de encouraçamento função da dimensão do material do fundo
K_f	Coefficiente de forma do pilar

K_g	Coeficiente de forma da secção transversal do escoamento
K_G	Fator da geometria do canal
K_l	Fator que traduz o efeito da intensidade do escoamento de aproximação
K_t	Fator tempo
K_{yb}	Fator de profundidade de escoamento versus largura do pilar
K_θ	Coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar
l	Comprimento do pilar
L	Comprimento dos detritos
S_0	Declive do leito
t	Tempo
T_d	Espessura dos detritos
U	Velocidade média do escoamento de aproximação
\vec{u}	Vetor velocidade
$u(y)$	Velocidade média do escoamento à distância y do fundo
u, v, w	Componente do vetor velocidade segundo os eixos x, y, z
U_a	Velocidade que conduz à quebra da camada de encouraçamento
U_c	Velocidade media critica ou de início de movimento do material do fundo
u_i	Componente do vetor da velocidade na direção i
U_R	Velocidade de atrito
V_f	Volume de fluido no método VOF
x_i	Componentes das coordenadas cartesianas
Y_{cr}, X_{cr}	Valores críticos do parâmetro de Shields e do número de Reynolds das partículas
Y_M	Contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível
Z	Altura de escoamento
θ	Ângulo de enviesamento
μ	Viscosidade dinâmica da água
μ_t	Viscosidade cinemática turbulenta
φ	Função genérica; fator adimensional relativo à forma do pilar

ν	Viscosidade cinemática da água
ρ	Massa volúmica da água
ρ_s	Massa volúmica do material do fundo
σ_D	Coefficiente de graduação
ε	Taxa de dissipação turbulenta
Δp	Incremento de pressão = $\rho \cdot [u(y)]^2 / 2$

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1 Enquadramento

É de conhecimento geral que a atividade da engenharia civil está e estará sempre associada a fatores de risco, sendo esta consequência de incertezas pertencentes à generalidade das variáveis que caracterizam o processo construtivo. A principal causa que contribui para a ocorrência de alguns insucessos é uma conjugação menos favorável de eventos associados a incerteza. A título de exemplo, num projeto de uma ponte o engenheiro procura que as ações a que a estrutura venha a estar sujeita durante a sua construção e vida útil não excedam a sua capacidade resistente. Para além disso, acresce os riscos associados às pontes construídas sobre fundos aluvionares, no que diz respeito às erosões localizadas, resultantes da grande variabilidade do comportamento dos rios, com extremos acentuados, desde caudais quase nulos até cheias muito intensas, com velocidades de escoamento elevadas e subidas de nível acentuadas (Rocha *et al.*, 2008).

Assim, na conceção de uma ponte, para além de se ter em consideração os aspetos relacionados com a sua fundação, as exigências de natureza estrutural, entre outras, é necessário ter especial atenção às características hidráulicas do curso de água, constituindo por vezes um elemento fortemente condicionante na análise das soluções a considerar. Para um correto dimensionamento, os parâmetros hidráulicos a considerar são a estabilidade do leito e margens, a evolução das erosões e deposição de sedimentos, as sobrelevações da superfície livre, *etc* (Ramos, 2005).

No que diz respeito às erosões localizadas, muitos investigadores concluíram que estas se desenvolvem na proximidade das fundações de pontes e que são uma das causas frequentes da sua queda ou da sua rotura parcial tendo sido registados vários acidentes ao redor do mundo devido à queda de pontes resultantes de processos erosivos, sendo que os principais danos ocorrem durante a ocorrência de cheias. O surgimento de uma cavidade de erosão no leito do rio resulta da presença destes obstáculos no seio do escoamento sendo este fenómeno agravado com a presença de detritos, detritos este que são compostos, principalmente, de troncos de árvores e galhos, transportados pelo escoamento e que se depositam junto aos obstáculos. Os detritos podem acumular-se em grandes quantidades, o que originam uma maior obstrução ao escoamento causando profundidades de erosão acima das profundidades observadas sob condições sem acumulação de detritos (Zevenbergen *et al.*, 2007 e Pinheiro, 2010).

O escoamento e as erosões localizadas que se desenvolvem em torno de pilares cilíndricos e suas fundações tem sido um assunto bastante desenvolvido ao longo das últimas quatro décadas visando caracterizar o fenómeno erosivo e quantificar a profundidade máxima das cavidades de erosão. Embora muito tenha sido publicado sobre este assunto baseado em trabalhos

laboratoriais, poucos estudos foram apresentados envolvendo modelação numérica tridimensional. Foram realizados alguns trabalhos que ofereceram contribuições importantes para a investigação numérica das erosões localizadas junto de pilares verticais, nomeadamente, Moussa *et al.* (2016), Li *et al.* (2013), Vasquez e Walsh 2009, Mehnifard *et al.* (2014) e Ghasemi e Gerdefaramarzi (2017) (Baykal *et al.*, 2015). No que diz respeito à modelação numérica sobre a influência dos detritos na profundidade das cavidades de erosão a literatura disponível restringe-se à contribuição de Moussa *et al.* (2016).

De acordo com o exposto anteriormente, constata-se que existe carência de estudos sistemáticos sobre o efeito dos detritos na morfologia das cavidades de erosão, aspeto que se acentua em termos de estudos numéricos. Assim, pretende-se com esta dissertação contribuir para a compreensão dos efeitos dos detritos nas cavidades de erosão, ampliando o conhecimento atual, através da realização de um modelo numérico com recurso ao Software FLOW-3D.

1.2 Organização do trabalho desenvolvido

A organização da dissertação reflete o procedimento adotado de modo a atingir os objetivos do trabalho. Assim, o documento é constituído por seis capítulos, cuja organização e o conteúdo mais relevante se sintetiza nesta mesma secção.

No presente capítulo, sendo ele o primeiro, começa-se por fazer um breve enquadramento do tema em estudo, seguido da definição dos objetivos da investigação e uma breve síntese da organização do trabalho.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão de conhecimentos sobre as erosões localizadas junto de pilares de pontes na ausência e na presença de detritos. É feita uma análise dos parâmetros intervenientes no processo erosivo e são apresentadas diferentes metodologias de cálculo da profundidade máxima das cavidades de erosão.

O terceiro capítulo é dedicado à modelação numérica, apresentando-se as equações governativas que regem os modelos de turbulência utilizados neste trabalho, bem como a descrição destes mesmos modelos. Por fim, é feita uma breve descrição do software utilizado, o FLOW-3D, e apresentados os diferentes métodos presentes neste software bem como a sua malha e condições iniciais e de fronteira.

No quarto capítulo é apresentado o procedimento numérico exemplificativo para uma simulação de escoamento, onde todas as componentes inerentes à mesma são expostas, bem como a validação do modelo computacional utilizado.

No quinto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nas simulações realizadas.

O sexto e último capítulo consiste na conclusão e reflexões finais deste trabalho, onde se apresentam as conclusões, bem como os possíveis trabalhos que se podem desenvolver no futuro.

CAPÍTULO 2 - Erosões localizadas junto de pilares

2.1 Introdução

As pontes são infraestruturas importantes e valiosas na sociedade moderna. Elas são projetadas para serem funcionais e econômicas, mas igualmente seguras. Um elevado número de pontes atravessam cursos de água cujo leito é composto por material aluvionar e no qual, por diversas causas, os pilares são fundados; por esse motivo, as fundações estão sujeitas a processos erosivos. As erosões localizadas que se desenvolvem junto dos pilares e de encontros de pontes, bem como junto das suas fundações, e que resultam diretamente da alteração do campo de escoamento induzido pela presença desses obstáculos no seio do escoamento são, certamente, uma das principais causas de vulnerabilidade dessas infraestruturas viárias. A bibliografia associada à temática está repleta de descrições de acidentes nestas estruturas como resultado do poder erosivo do escoamento em leitos aluvionares, nomeadamente, durante a ocorrência de cheias. Previsões precisas das erosões localizadas podem levar a projetos de ponte mais eficientes, mantendo o nível de segurança necessário (Nankervis, 2016). Apesar do conhecimento sobre a previsão das profundidades das cavidades de erosão bem como do estabelecimento de medidas de proteção para minimizar o seu efeito ter progredido rapidamente nos últimos 50 anos, ainda subsistem dúvidas quanto ao grau das previsões fornecidas pelos métodos disponíveis, em consequência da complexidade dos fenómenos envolvidos (Fael, 2007). No entanto, o efeito da acumulação de detritos junto dos pilares de ponte no processo erosivo não é ainda uma preocupação presente devido à falta de conhecimento, apesar de ser um problema contínuo (Park *et al.*, 2016). Existe, por isso, a necessidade de métodos precisos para quantificar os efeitos dos detritos nas cavidades de erosão junto de pilares de pontes para utilização em projeto, operação e manutenção de pontes rodoviárias (Zevenbergen *et al.*, 2007).

Os detritos, compostos sobretudo por troncos e ramos de árvores, transportados pelos escoamentos, acumulam-se geralmente junto das pontes durante os eventos de precipitações intensas. A acumulação desses detritos podem obstruir, contrair ou redirecionar o escoamento através dos vãos das pontes, originando inundações, cargas excessivas ou agravamento das erosões localizadas nas fundações das pontes. A dimensão e a forma dos detritos acumulados variam amplamente, desde um pequeno aglomerado de detritos junto a um pilar até ao bloqueio quase completo de um vão da ponte. Assim, os seus efeitos podem variar desde uma pequena obstrução do escoamento até uma contração severa, resultando numa erosão significativa da fundação da ponte (Zevenbergen *et al.*, 2007).

No presente capítulo desta dissertação apresenta-se uma síntese de conhecimentos direcionada para a caracterização do fenómeno erosivo junto de pilares de pontes, bem como o efeito dos detritos na morfologia e na profundidade máxima das cavidades de erosão. São ainda

apresentados dois métodos para estimar a profundidade máxima das cavidades de erosão, que incluem o efeito dos detritos.

2.2 Erosões localizadas junto de pilares isolados

O homem tem uma responsabilidade determinante no fenómeno erosivo pois influencia a dinâmica natural dos cursos de água com a construção de obras que provocam a contração lateral do escoamento ou a retenção de sedimentos, como é o caso das barragens ou dos encontros de pontes. Por outro lado, a extração de inertes agrava ainda mais o processo erosivo, caso não exista um controlo eficaz das entidades que exercem essa atividade, pois é um processo artificial com potenciais efeitos negativos (Pinheiro, 2010).

No que concerne ao processo erosivo, e tal como referido anteriormente, resulta da presença de obstáculos no seio do escoamento, sendo impulsionado principalmente pela interação entre estes e o leito móvel originando alterações no campo de escoamento como as velocidades médias, a intensidade de turbulência e as tensões de Reynolds. O seu mecanismo é complexo e, ao longo dos tempos, vários autores o tentaram descrever (Melville e Coleman, 2000 e Couto e Cardoso, 2001).

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. O qual se traduz num incremento do termo de pressão, Δp , de aproximadamente $\rho \cdot [u(y)]^2 / 2$, em que ρ representa a massa volúmica da água e $u(y)$ é a velocidade média do escoamento à distância y do fundo, como exemplificado na Figura 2.1 Este incremento é tanto maior quanto maior for a diminuição da velocidade. Como consequência desta alteração do campo de pressões pode observar-se (Fael, 2007):

- 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 jato vertical, no sentido das maiores para as menores pressões. Este escoamento, ao incidir no leito, é parcialmente defletido para montante, como exemplificado na Figura 2.2;
- A separação do escoamento junto ao fundo, um pouco a montante do obstáculo, e na superfície lateral do pilar.

A ação conjunta do escoamento descendente defletido e do escoamento separado junto ao fundo dá origem ao vórtice em ferradura. Este vórtice tem um papel importante no processo erosivo a montante do pilar e ao dissipar-se mais a jusante no escoamento contribui principalmente para a escavação a jusante. Os vórtices de esteira são devidos à separação do escoamento na superfície lateral dos pilares de onde se desprendem periodicamente, estes

apresentam sentidos de rotação alternadamente opostos ao longo do percurso para jusante. No processo erosivo tem um efeito de sucção, quase vertical, que juntamente com o efeito de arrastamento do material do fundo do vórtice em ferradura, removem esse material e transportam-no em suspensão (Calcada, 2012).

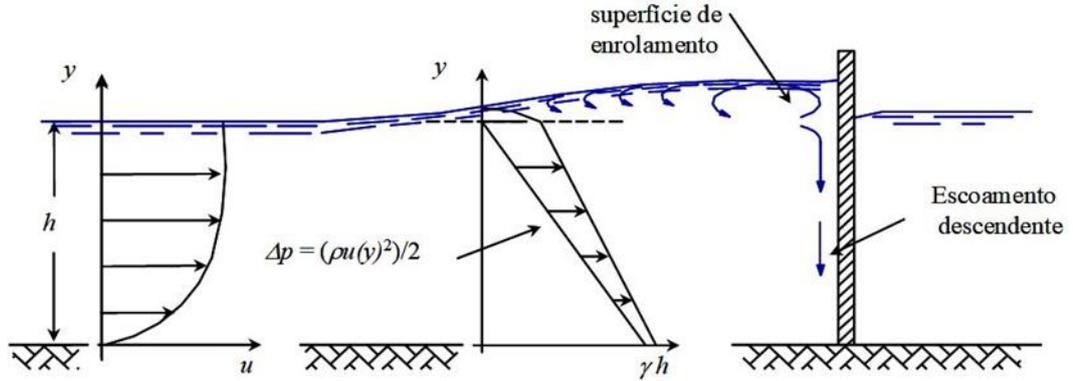


Figura 2.1 - Alteração do campo de pressões do escoamento a montante de um pilar (Fael, 2007).

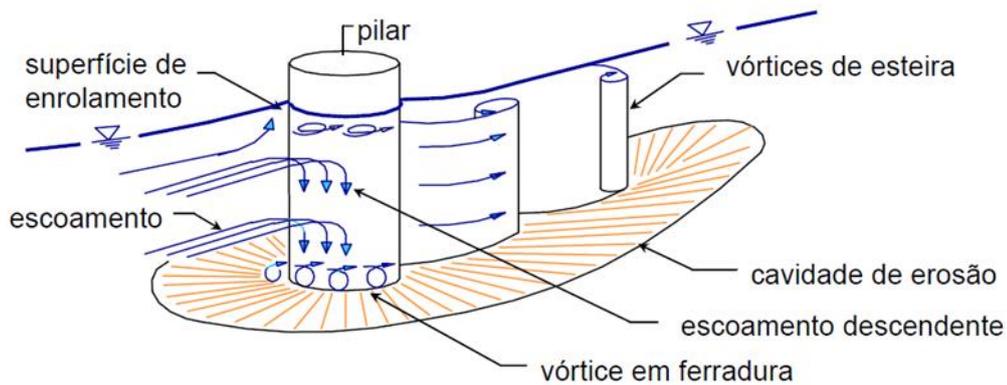


Figura 2.2 - Estrutura do escoamento junto de um pilar (adaptado Couto e Cardoso, 2001).

O processo erosivo junto de pilares isolados que se acaba de descrever é caracterizado por um elevado número de variáveis independentes, nomeadamente: variáveis do escoamento de aproximação (altura do escoamento, h ; perda da carga unitária, J e aceleração da gravidade, g); variáveis do fluido (massa volúmica, ρ , e viscosidade cinemática, ν); variáveis do material do fundo (diâmetro mediano, D_{50} ; coeficiente de graduação, σ_D e massa volúmica, ρ_s); variáveis descritivas do pilar (largura do pilar, b , coeficiente de forma do pilar, K_f , e coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar, K_θ); variáveis que descrevem a geometria do canal (largura do canal, B ; inclinação do leito, S_0 , e coeficiente de forma da secção transversal, K_g); e o tempo, t . A equação genérica que permite caracterizar a profundidade da cavidade de erosão num dado instante, h_s , pode ser expressa pela seguinte equação (Fael, 2007):

$$h_s = \varphi (h, J, g, \rho, \nu, D_{50}, \sigma_D, \rho_s, b, K_f, K_\theta, B, S_0, K_g, t) \quad (2.1)$$

Considerando que o fenómeno erosivo que se desenvolve em torno de um pilar cilíndrico isolado ocorre: i) sem transporte generalizado de material sólido no troço de aproximação; ii) que o escoamento é turbulento rugoso na proximidade do pilar; iii) que o escoamento é uniforme e se encontra completamente desenvolvidos em secções transversais retangulares muito largas; e que v) o material do fundo seja constituído por areia uniforme insuscetível de dar origem à formação de rugas, pode demonstrar-se, por aplicação do teorema de Vaschy-Bukingham, que a profundidade de erosão é descrita pela seguinte função genérica (Lança *et al.*, 2012):

$$\frac{h_s}{D_p} = \varphi_1 \left(\frac{h}{D_p}; \frac{U}{U_c}; \frac{D_p}{D_{50}}; \frac{Ut}{D_p} \right) \quad (2.2)$$

onde D_p é o diâmetro do pilar cilíndrico, U é a velocidade média do escoamento de aproximação e U_c o correspondente valor da velocidade média crítica ou de início do movimento do material do fundo no escoamento de aproximação.

Salienta-se que: i) se entende por escoamento completamente desenvolvido aquele em que a camada limite ocupa toda a respetiva altura do escoamento; ii) que se considera secções retangulares muito largas as que preservam uma distribuição de velocidades bidimensional na zona central (o que requer $B/h > 5$ (Breusers e Raudkivi, 1991), sendo B a largura da secção transversal); iii) que a areia se considera uniforme quando o coeficiente de graduação da respetiva curva granulométrica é inferior a 1,5 (Raudkivi e Ettema, 1983); iv) que essa areia não é compatível com a formação de rugas quando o diâmetro mediano é superior a 0,6 mm (Chiew, 1984) e v) que, sendo o escoamento turbulento rugoso na proximidade do pilar, se pode admitir que a viscosidade da água não influencia o processo erosivo (Lança *et al.*, 2012).

Na Equação (2.2), o h_s/D_p representa a profundidade da cavidade de erosão adimensionalizada pelo diâmetro do pilar, o h/D_p a profundidade relativa do escoamento de aproximação, o U/U_c a intensidade do escoamento de aproximação, o D_p/D_{50} traduz o efeito da granulometria do material do fundo e Ut/D_p traduz o efeito do tempo.

Seguidamente, são apresentados os parâmetros adimensionais de maior relevância no processo erosivo e que simultaneamente sejam preponderantes na realização do presente trabalho.

- Efeito do tempo

Este é um dos principais fatores a ter em conta no processo erosivo, e o seu efeito está muito ligado ao efeito da velocidade média do escoamento de aproximação. Para valores muito baixos da velocidade média do escoamento de aproximação não se observam erosões localizadas junto aos pilares e o escoamento comporta-se como na presença de um fundo fixo. O processo erosivo inicia-se quando a velocidade média do escoamento de aproximação atinge cerca de metade do valor da velocidade crítica para o material de fundo e, à medida que a velocidade aumenta, o processo desenvolve-se completamente. A profundidade da cavidade de erosão aumenta de forma rápida na fase inicial do processo erosivo. Nas zonas em que a inclinação dos seus taludes

é superior ao ângulo de repouso do material do fundo ocorre o deslizamento de quantidades consideráveis de sedimentos que, agora é possível transportar para jusante. Os limites da cavidade de erosão vão-se alargando à medida que o processo se desenrola no tempo, tanto para montante como para as zonas laterais. Todo o material que é transportado para jusante, por arrastamento ou em suspensão, deposita-se nas proximidades do talude de jusante. Desta forma, a própria cavidade vai crescendo e sendo empurrada para jusante (Couto e Cardoso, 2001).

O processo descrito anteriormente vai tender para uma situação de equilíbrio e o ritmo com que atinge esse equilíbrio depende da existência ou não de transporte sólido generalizado no escoamento de aproximação. Se o escoamento ocorrer sem transporte sólido generalizado, o equilíbrio é atingido de forma assintótica e é denominada por equilíbrio estático. Para o caso do escoamento ocorrer com transporte sólido generalizado, o equilíbrio considera-se que é atingido quando a quantidade de sedimentos que aflui à cavidade de erosão é igual à quantidade que dele sai e é designado por equilíbrio dinâmico. Neste caso, a profundidade de erosão oscila entre certos limites, sendo estas oscilações consequência da periodicidade com que o material sólido transportado de montante alimenta a cavidade de erosão. O equilíbrio é atingido muito mais rapidamente do que quando não há transporte sólido generalizado. No entanto, em ambas as situações, a profundidade da cavidade de erosão atinge o seu valor máximo (Couto e Cardoso 2001). Para uma melhor compreensão apresenta-se na Figura 2.3 a evolução temporal da profundidade de cavidades de erosão com e sem transporte sólido generalizado.

A evolução temporal da profundidade máxima das cavidades de erosão que se verificam junto de pilares simples, em escoamentos sem transporte sólido generalizado, segue uma tendência logarítmica, de acordo com o constatado na maioria dos estudos experimentais, *i.e.* Ettema (1980) e Melville e Coleman (2000).

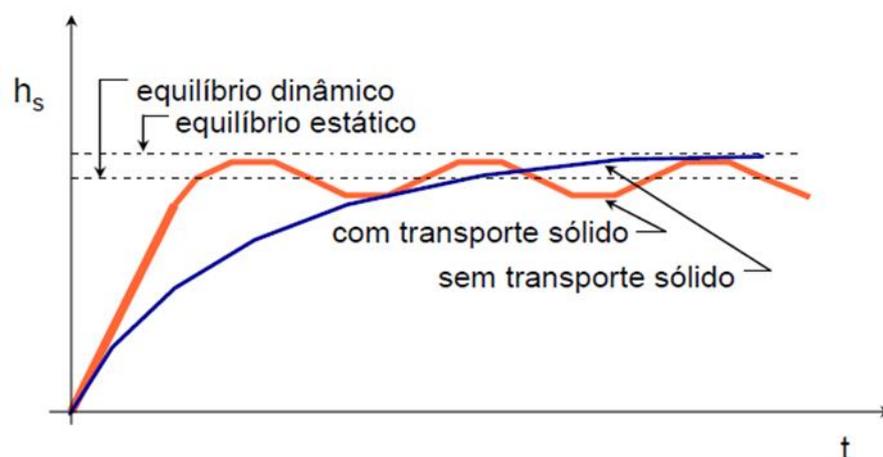


Figura 2.3 Evolução temporal da profundidade de cavidades de erosão com e sem transporte sólido generalizado (adaptado Fael 2007).

Independentemente da situação é possível identificar três fases do processo erosivo (visíveis também na Figura 2.4):

- Fase inicial - a profundidade de erosão junto ao pilar aumenta de forma rápida;
- Fase principal - verifica-se um aumento da profundidade da cavidade de erosão e uma expansão em planta. O ritmo é menos intenso do que na primeira fase;
- Fase de equilíbrio - a cavidade de erosão deixa praticamente de evoluir.

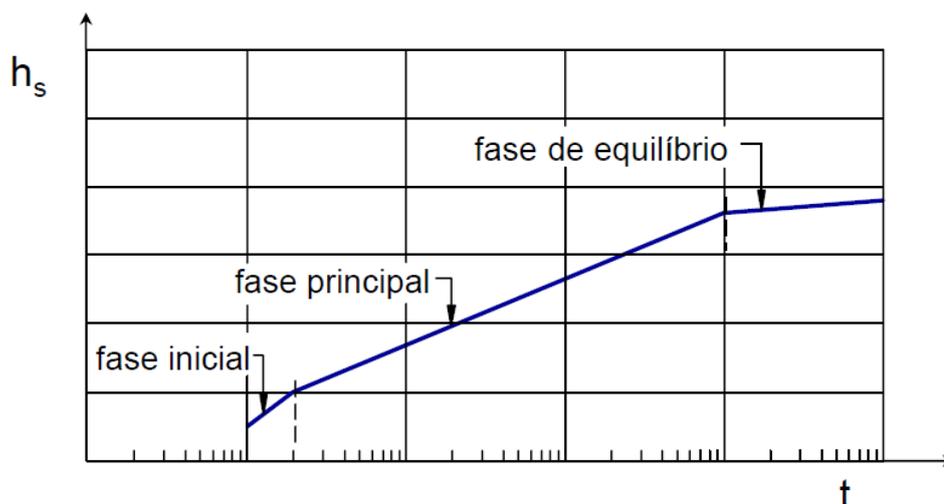


Figura 2.4 Fases do processo erosivo (Couto e Cardoso, 2001).

- Fator da intensidade de escoamento, K_I :

O fator $K_I = U/U_c$ é o fator que exhibe o efeito da intensidade do escoamento na profundidade das cavidades de erosão e é representado como a razão entre a profundidade de erosão associada a uma determinada intensidade do escoamento e a profundidade de erosão máxima, para um conjunto de dados onde a velocidade do escoamento varia e todos os outros parâmetros dependentes são mantidos constantes (Calçada, 2012).

O desenvolvimento da cavidade de erosão depende da intensidade de escoamento e pode ocorrer em condições com ou sem transporte sólido generalizado. É importante esta distinção visto que o desenvolvimento da cavidade de erosão é diferente para cada uma das situações (Melville e Coleman, 2000).

Na Figura 2.5 esta representado o gráfico proposto por Melville e Coleman (2000) onde é apresentada a variação da profundidade de erosão em função da intensidade do escoamento e da curva granulométrica do material de fundo, faz também a diferenciação entre o caso dos sedimentos serem uniformes ou não. Desta forma, e para condições de escoamento sem

transporte sólido a profundidade das cavidades de erosão em sedimentos uniformes aumenta quase linearmente com a velocidade até igualar a velocidade de início de movimento.

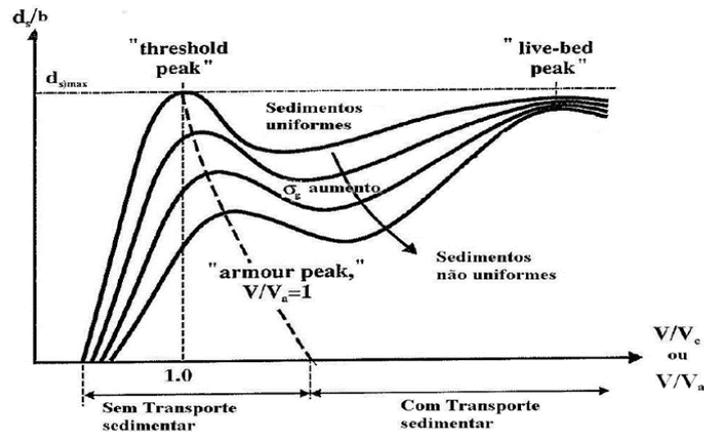


Figura 2.5 Variação da profundidade de erosão local com intensidade do escoamento (adaptado de Melville e Coleman, 2000).

- Fator característico dos sedimentos, K_{D50} :

O fator característico dos sedimentos, K_{D50} , traduz a relação entre a dimensão dos sedimentos e a largura do pilar, D_{50}/b , e é um dos fatores que exerce influência sobre a formação e desenvolvimento das cavidades de erosão. Estudos realizados em laboratório mostraram que a profundidade de erosão não é afetada por esse fator para relações de $b/D_{50} > 50$ (Melville e Coleman, 2000). Na Figura 2.6 apresenta-se esquematicamente a influência da dimensão dos sedimentos na profundidade de erosão.

Ettema (1980) refere que na condição em que a largura do pilar é relativamente próxima da dimensão média dos sedimentos, como a sua dimensão é grande provoca uma dissipação da energia do escoamento através do contacto com os poros do material do fundo. Devido a este facto, o escoamento perde capacidade de transporte dos sedimentos e o desenvolvimento do processo de erosão é impedido.

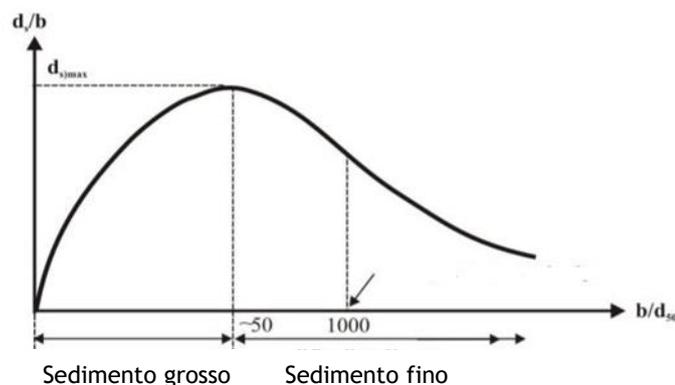


Figura 2.6 Variação da profundidade de erosão com a dimensão do sedimento (adaptado de Melville e Coleman, 2000).

- Fator de alinhamento do pilar em relação à direção do escoamento:

O ângulo formado entre o escoamento e o pilar, θ , com exceção dos pilares cilíndricos influencia significativamente a profundidade de erosão, dado que as suas dimensões não variam ao longo do seu perímetro, sendo a cavidade de erosão, função da largura projetada na direção normal ao escoamento. Sendo assim, um pilar longo, que tenha um ângulo de orientação com o escoamento grande, ou seja um ângulo de ataque, terá uma cavidade de erosão, fundamentalmente, maior do que um pilar mais curto ou com um ângulo de ataque inferior. Com o aumento do ângulo de orientação do pilar com o escoamento, o ponto máximo de profundidade da cavidade de erosão move-se, progressivamente, para a parte posterior do pilar. Pode-se então concluir que o ponto em que ocorre a maior profundidade de erosão depende, da razão entre comprimento do pilar com a sua largura (Pinheiro, 2010).

Laursen e Toch em 1956 desenvolveram o gráfico que se apresenta na Figura 2.7 e este é utilizado na maior parte dos métodos de cálculo de profundidades de erosão. Os valores de K_θ , correspondente ao fator de alinhamento do pilar em relação à direção do escoamento, são obtidos normalizando os valores para $\theta = 0^\circ$. O gráfico refere-se a pilares retangulares, no entanto, com bom senso pode ser utilizado para outras formas de pilares.

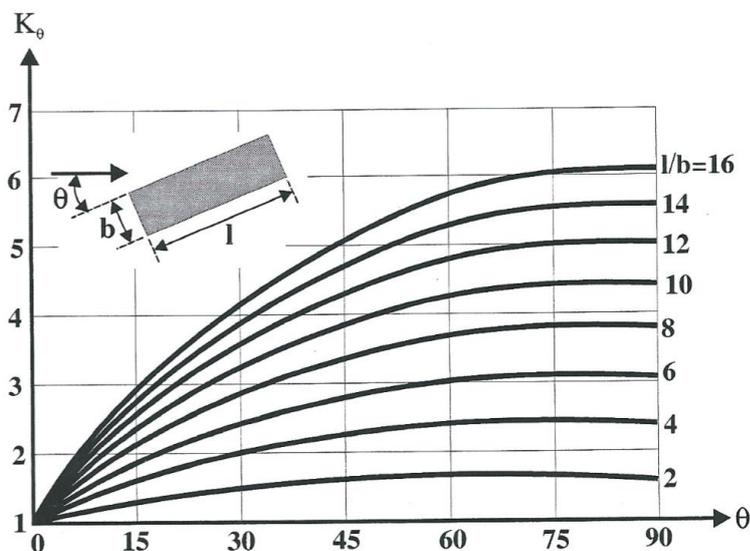


Figura 2.7 Variação da profundidade de erosão com o alinhamento do pilar (adaptado de Melville e Coleman, 2000).

2.3 Efeito dos detritos nas cavidades de erosão

Sempre que uma obra de engenharia, nomeadamente uma ponte, é projetada para um ambiente fluvial, existe a possibilidade de se confrontar com a presença de detritos. A sua produção e transporte são características naturais da maioria dos cursos de água, sendo a taxa de produção dependente do seu grau de instabilidade (Diehl, 1997). A acumulação de detritos é um problema comum para as pontes, causando contrações do escoamento, reduzindo a largura da via navegável, aumentando a erosão local e aumentando a obstrução devido à acumulação de sedimentos (Kattell e Eriksson, 1998). O potencial e a extensão da acumulação de detritos é influenciado significativamente pela localização, tipo e a inclinação dos pilares que constituem a ponte (NCHRP_RPT_653, 2010).

Priorizando os efeitos causados pela presença dos detritos, a erosão localizada é a principal preocupação seguida pelas forças laterais (Pangallo *et al.*, 1992). Em algumas pontes onde o nível das cheias atingiu o tabuleiro as forças causadas pelos detritos foram responsabilizadas por danos sérios, independentemente dos efeitos erosivos. Forças exercidas pelos detritos em pilares em combinação com a erosão localizada podem ter contribuído para várias falhas em pilares (Diehl, 1997 e Moussa *et al.*, 2016).

Como referido anteriormente, a acumulação de detritos junto da estrutura exerce forças significativas sobre ela sendo os seus efeitos um aspeto relevante no projeto. Assim, os efeitos decorrentes quer da força do impacto inicial, quer da erosão resultantes da acumulação de detritos devem ser quantificados, apesar da complexidade na sua avaliação resultante da variabilidade na permeabilidade, na localização e na dimensão (Laursen e Toch, 1956).

O transporte de detritos, incluindo o seu tipo, os mecanismos pelos quais entram no escoamento e a forma como eles se movem com o escoamento, dependem muito das características do rio e do meio ambiente pelo qual ele flui. Ainda assim, podem-se considerar três classificações principais para as dimensões dos detritos lenhosos (Bradley *et al.*, 2005):

- Pequenos detritos - consistem em pequenos ramos, folhas e lixo. Devido à sua pequena dimensão podem ser transportados para o escoamento de várias maneiras, como por exemplo, pelo vento e mudanças sazonais;
- Detritos médios - consistem principalmente de ramos maiores e podem entrar no escoamento através de pequeno afluentes ou através de escoamento superficial, devido à erosão das margens ou à quebra de detritos maiores, e através de cheias;
- Grandes detritos - consistem em ramos muito grandes e árvores inteiras e, de um modo geral, podem entrar no escoamento da mesma forma que os detritos médios.

Quanto à localização dos detritos, é função da sua dimensão e das características da estrutura. A acumulação de detritos nas pontes ocorre quando os detritos transportados pelo escoamento

colidem com os seus elementos estruturais, aprisionando-os. A maioria das acumulações de detritos observadas agrupam-se em dois grupos (Diehl, 1997):

- acumulação junto a um pilar isolado. Estas assumem diferentes formas, sendo as mais recorrentes: forma aproximada de meio cone invertido, forma retangular e forma triangular. A forma triangular tende a ter uma forma cônica no perfil, enquanto a forma retangular tende a ter um perfil de prisma quadrangular;
- bloqueio em extensão.

Um outro tipo de geometria de detritos é o perfil cônico invertido, apresentando geralmente uma planta triangular. Esse tipo de acumulação ocorre geralmente após uma ou mais cheias quando os detritos acumulados com uma geometria triangular-cônica assenta no leito do curso de água. A parte inferior dos detritos fica então embutida no leito. Quando ocorre uma nova cheia, os detritos permanecem presos no leito, mas pode aumentar em tamanho devido ao aprisionamento de detritos adicionais. À medida que mais detritos são aprisionados durante os escoamentos subsequentes uma geometria prisma retangular pode desenvolver-se (Zevenbergen *et al.*, 2007).

A acumulação de detritos junto ao pilar contém geralmente um ou mais troncos que se estendem perpendicularmente ao sentido do escoamento. Grandes acumulações de detritos são mantidas juntas por longos troncos que suportam o atolamento contra forças hidráulicas laterais. A acumulação que se verifica junto ao pilar apresenta, geralmente, uma aparência curva a montante quando vistos de cima, e o centro do lado de jusante, que assenta no pilar, contém a parte mais espessa da acumulação (NCHRP_RPT_653, 2010).

A Figura 2.8 apresenta um esquema de uma acumulação de detritos com uma geometria cônica depois da água recuar e os detritos colapsarem sobre si mesmos. Todos os tipos de perfis de acumulação de detritos podem evoluir de uma acumulação de superfície para parcialmente ou totalmente submersas, dependendo da profundidade do escoamento (Zevenbergen *et al.*, 2007).

As Figuras 2.9 e 2.10 ilustram formas típicas de detritos (retangulares e cônicas de perfil e retangulares ou triangulares no plano) e definem as dimensões para as várias formas. Onde T_d é a espessura dos detritos, b_d a sua largura e L o comprimento na direção perpendicular ao escoamento.

À medida que os detritos flutuantes se acumulam junto às estruturas começam a impulsionar o escoamento no sentido descendente, direcionando-o para o leito do rio, modificando significativamente as erosões localizadas (Tyler, 2011). Ou seja, a acumulação de detritos em torno de um pilar pode modificar substancialmente a morfologia da cavidade de erosão. Esses detritos influenciam a estrutura hidráulica, desenvolvendo uma nova configuração da cavidade. Como resultado, e de um modo geral, as dimensões da profundidade de erosão aumentam à

medida que aumenta o tamanho dos detritos. Pagliara e Carnacina (2010, 2011) não só mostraram que a acumulação de detritos aumenta a profundidade máxima da cavidade de erosão junto ao pilar, mas também que a sua rugosidade afeta a evolução temporal. Atualmente, existem informações limitadas sobre o efeito da acumulação de detritos na evolução temporal das cavidades de erosão.

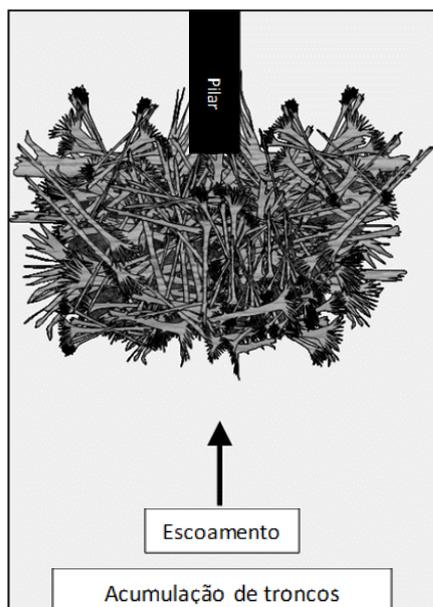


Figura 2.8 Acumulação de troncos (adaptado de Zevenbergen *et al.*, 2007)

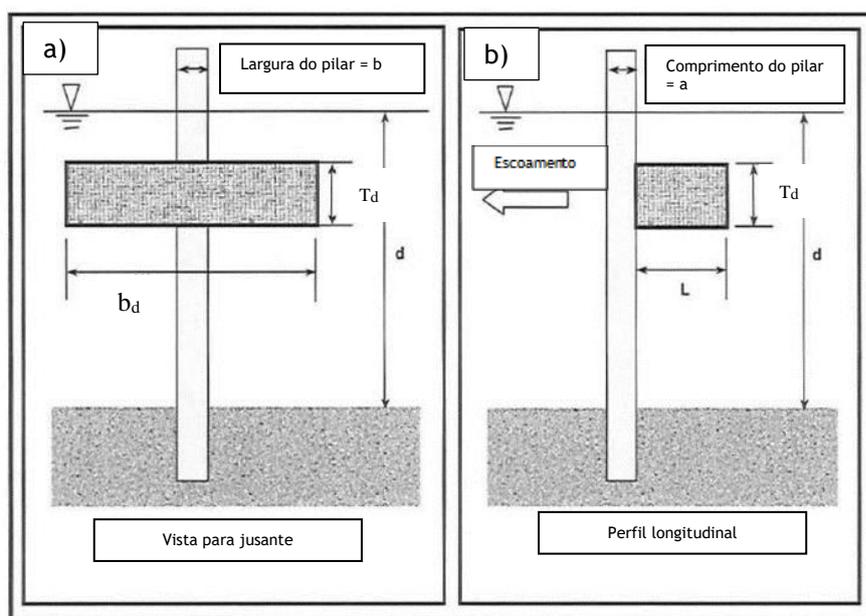


Figura 2.9 Forma retangular: a) Vista para jusante; b) Perfil longitudinal (adaptado de Lagasse *et al.*, 2010).

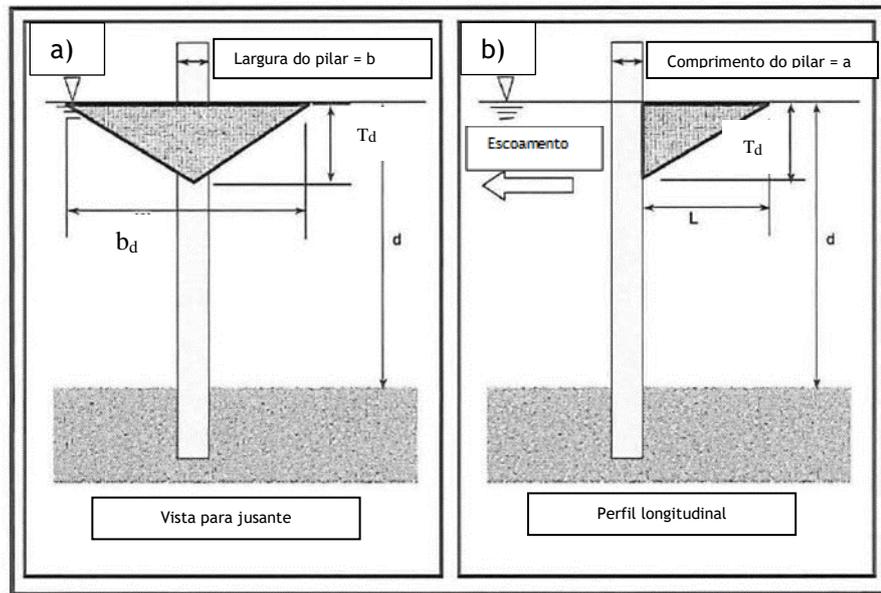


Figura 2.10 Forma triangular/cônica: a) Vista para jusante; b) Perfil longitudinal (adaptado de Lagasse *et al.*, 2010)

O escoamento junto ao pilar com um aglomerado de detritos retangular é significativamente obstruído e forçado a mergulhar sob a face a montante dos detritos, como mostra a Figura 2.11 a). Numa configuração triangular, a espessura dos detritos é maior na face do pilar, afunilando para cima e diminuindo em direção ao ponto principal (a montante). O padrão de erosão criado pelos aglomerados de detritos triangulares (Figura 2.11 b)) é marcadamente diferente daquele exibido pelos aglomerados retangulares (Lagasse *et al.*, 2010).

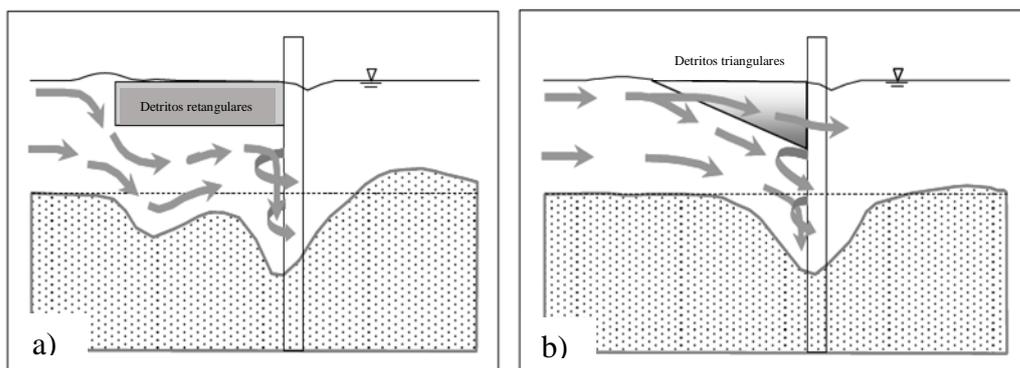


Figura 2.11 Padrão de escoamento junto ao pilar na presença de aglomerados de detritos: a) detritos retangulares; b) detritos triangulares (adaptado de Lagasse *et al.*, 2010)

2.3 Equações de cálculo da profundidade máxima de cavidades de erosão

É do conhecido geral que os riscos associados aos pilares fundados em leitos aluvionares, originados pelo desenvolvimento de cavidades de erosão que, em contextos excepcionais, induzem a queda desses pilares e o colapso ou a rotura parcial das pontes em que se integram, são conhecidos desde a antiguidade. Deste modo, a previsão da profundidade de equilíbrio de cavidades de erosão constitui-se, por isso, num espectro importante do projeto de pontes (Lança *et al.*, 2012 e Rocha *et al.*, 2008).

Sustentadas por trabalho experimental, modelos numéricos e dados de campo com diferentes aplicabilidades, existe uma panóplia de formulações empíricas para estimar a profundidade máxima ou de equilíbrio de cavidades de erosão. As disparidades verificadas nos resultados obtidos por estas formulações devem-se à difícil reprodução na modelação física, ou seja, aos efeitos de escala, em laboratório dos movimentos de escoamento, da densidade e dimensão dos sedimentos do leito, da localização da ponte, entre outros. Como se verificam por vezes subestimações de profundidades máximas de cavidades de erosão tem-se denotado uma crescente preocupação na aplicabilidade destas formulações, o motivo deve-se muito ao facto de haver dificuldades na recolha de dados para calibração dos modelos de análise numérica. Estas recolhas efetuam-se durante as cheias e nestas, não só os caudais de ponta são muito curtos, não permitindo facilmente a criação de cavidades de erosão, como se verifica nas fases finais das mesmas cheias, um preenchimento das cavidades de erosão com sedimentos presentes no escoamento. Contudo, há que notar que foi graças à utilização destes modelos de análise numérica e devido também aos acidentes com pilares de pontes (mais comuns e mais gravosos que do que os acidentes com encontros), que se verificaram nos últimos anos, grandes passos no sentido da evolução na análise e compreensão do fenómeno da erosão junto dos pilares (Cardoso, 2008).

Várias equações e metodologias foram desenvolvidas por vários autores para avaliar a profundidade máxima das cavidades de erosão. Neste estudo, são apresentadas as metodologias sugeridas por Melville e Coleman (2000) e Richardson e Davis (2001), por serem atualmente as mais utilizadas na prática de projeto e por englobarem um conjunto alargado de fatores intervenientes no processo erosivo. Estas metodologias resultam sobretudo de estudos realizados em laboratório.

2.3.1 Método de Melville e Coleman (2000)

A equação de previsão da profundidade de erosão proposta por Melville e Coleman e que se encontra no manual *Bridge Scour*, publicado em 2000, é apresentada na Equação (2.3). Esta equação é função de vários parâmetros, K 's, que têm em conta os diferentes fatores que influenciam o fenómeno erosivo, e pode ser aplicada em ambas as condições de transporte

sólido generalizado. É uma das expressões que reúne maior consenso na atualidade devido ao elevado número de parâmetros que integra na sua formulação (Silva, 2008).

$$h_{se} = K_{yb}K_lK_dK_fK_\theta K_G \quad (2.3)$$

Onde: h_{se} é a profundidade de equilíbrio das cavidades de erosão; K_{yb} é o fator de profundidade de escoamento versus largura do pilar; K_l é o fator de intensidade de escoamento; K_d é o fator de características dos sedimentos; K_f é o fator de forma do pilar; K_θ é o fator de alinhamento do pilar em relação à direção do escoamento; e K_G é o fator da geometria do canal.

Seguidamente, são apresentados os parâmetros de forma individual.

- Fator K_{yb} - Parâmetro que relaciona a profundidade do escoamento e a largura do pilar

De modo a que os valores registados fossem unicamente consequência dos dois fatores em estudo houve necessidade de garantir determinadas condições de ensaio. A aplicação dessas condições, referidas a seguir, permite garantir que os ensaios não foram afetados pela intensidade do escoamento, tamanho e granulometria dos sedimentos, forma e alinhamento da fundação, e também pelo efeito do tempo: a primeira condição de ensaio diz que $U/U_c \approx 1$ isto significa que é, o limite condicional; a segunda condição diz que $B/d_{50} > 50$, para sedimento grosseiro; a terceira condição é que o coeficiente de graduação σ_g tem que ser menor que 1.3, para sedimento uniforme; para pilares circulares e pilares de parede vertical, são utilizadas formas de base padrão; os pilares tem que estar alinhados ou seja $\theta = 0^\circ$; os canais tem que ser retangulares para obter a erosão de equilíbrio (Melville e Coleman, 2000)).

Deste modo, o fator de correção da profundidade do escoamento relativa à dimensão da fundação é dado por:

$$K_{hb} = 2,4b \quad , \quad \frac{b}{h} < 0,7 \quad (2.4)$$

$$K_{hb} = 2\sqrt{hb} \quad , \quad 0,7 < \frac{b}{h} < 5 \quad (2.5)$$

$$K_{hb} = 4,5h \quad , \quad \frac{b}{h} > 5 \quad (2.6)$$

-Fator K_l - Intensidade do escoamento

Este fator é definido como o quociente entre a profundidade de erosão para uma dada intensidade do escoamento e a profundidade máxima registada, sendo que K_l representa os efeitos da intensidade ou da velocidade do escoamento na profundidade de erosão junto ao

pilar. Neste fator os parâmetros interveniente mantem-se constantes com exceção da velocidade U que varia (Melville e Coleman, 2000).

Este parâmetro para sedimentos uniformes e não uniformes é representado por:

$$K_I = \frac{U - (U_a - U_c)}{U_c} \quad , \quad \frac{U - (U_a - U_c)}{U_c} < 1 \quad (2.7)$$

$$K_I = 1 \quad , \quad \frac{U - (U_a - U_c)}{U_c} \geq 1 \quad (2.8)$$

onde U_a representa a velocidade que conduz à quebra da camada de encouraçamento que se forma quando o material não é uniforme. No caso de o material ser uniforme, $U_a = U_c$.

-Fator K_d - tamanho do sedimento

Para o cálculo do fator K_d para sedimentos uniformes e não uniformes as expressões são as seguintes:

$$K_d = 0,57 \log \left(2,24 \frac{b}{d_{50}} \right) \quad , \quad \frac{b}{d_{50}} \leq 25 \quad (2.9)$$

$$K_d = 1,0 \quad , \quad \frac{b}{d_{50}} > 25 \quad (2.10)$$

Salienta-se que de acordo com este método existe um limite superior de $h_{se} = 2,4 D_p$ quando $h/D_p > 10/7$ e $D_p/D_{50} > 25$.

- Fator K_f - Forma do pilar

A forma do pilar é um fator que influencia diretamente a forma da cavidade de erosão que este irá originar, não só quanto à máxima profundidade da cavidade como também à localização da erosão e deposição de sedimentos (Azevedo, 2014). Os obstáculos fazem uma obstrução ao escoamento e a profundidade de erosão é função desse fator. Para prever a profundidade máxima de erosão, os investigadores relacionam as diferentes formas dos pilares multiplicando diferentes fatores de forma, para comparar com o pilar standard, ou seja, o pilar com a forma circular (Leite, 2013 e Couto e Cardoso, 2001).

Assim, este parâmetro, K_f é definido pelo quociente entre a profundidade de erosão para uma dada forma de pilar e a profundidade de erosão num pilar circular, sendo esta considerada a forma padrão (Melville e Coleman, 2000). Na Figura 2.12 apresentam-se resumidamente as diferentes formas de pilares e os respetivos coeficientes são resumidos na Tabela 2.1.

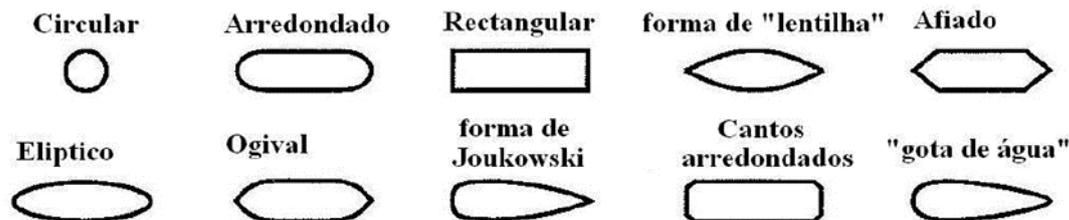


Figura 2.12 Formas de pilares correntemente utilizados (adaptado de Melville e Coleman, 2000).

Tabela 2.1-Valores do fator K_f para diferentes geometrias do pilar.

Forma		K_f
Uniforme	Cilíndrico ou circular	1,0
	Quadrado	1,1
	Angulosa	0,9
	Arredondado	1,0

- Fator K_θ - Alinhamento do pilar em relação à direção do escoamento

O fator relativo ao alinhamento do pilar com o escoamento, K_θ , é definido pela razão entre a profundidade de erosão num pilar enviesado e a profundidade registada num pilar em perfeito alinhamento com o escoamento. O alinhamento perfeito é dado por $\theta = 0^\circ$ (Melville e Coleman, 2000).

A equação para o cálculo do K_θ para pilares não circulares é:

$$K_\theta = \left(\frac{l}{b} \sin \theta + \cos \theta \right)^{0,65} \quad (2.11)$$

sendo θ o ângulo de enviesamento, l o comprimento do pilar. Para pilares circulares $K_\theta = 1,0$.

- Fator K_C - Geometria do canal

É frequente utilizar um canal retangular em laboratórios, mas este não é um canal natural de um rio, logo, o efeito destas diferenças no canal assenta nas várias influências que as características do canal têm na profundidade de erosão localizada. As variabilidades do canal e o seu efeito na erosão integram os efeitos das características seguintes (Brito, 2011):

- A secção transversal no canal;
- O perfil transversal da velocidade de escoamento a montante do pilar;

- A distribuição da rugosidade das margens e fundos do canal a montante do pilar;
- Considerando um escoamento uniforme em secção retangular, o efeito da forma da secção do canal de aproximação no parâmetro U/U_c .

Melville e Coleman (2000) garantem que se considera que a erosão localizada em pilares de pontes não é afetada pela geometria do canal desde que sejam utilizados valores apropriados de y e U para estimar a profundidade de erosão.

2.3.2 Método de Richardson e Davis, 2001

Nos Estados Unidos da América (EUA), a estimativa da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada em solos arenosos (h_s) é efetuada tendo em conta as Normas Americanas (*Hydraulic Engineering Circular*) H.E.C. 18 (Richardson e Davies, 2001), sendo a mesma calculada através da expressão (Azevedo, 2014):

$$\frac{h_{se}}{h} = 2.0 \times K_f \times K_\theta \times K_{cf} \times K_e \left(\frac{b}{h}\right)^{0.65} \times Fr^{0.43} \quad (2.14)$$

Onde: K_f é o coeficiente da forma do pilar; K_θ é o coeficiente do ângulo de incidência do escoamento; K_{cf} é o coeficiente de configuração de fundo; K_e é o coeficiente de encouraçamento função da dimensão do material do fundo; e Fr representa o número de Froude ($Fr = U/\sqrt{g x h}$).

Para o cálculo do número de Froude devem-se avaliar as velocidades críticas sendo representadas por U_c , para o cálculo das mesmas apresentam-se as seguintes fórmulas (Cardoso, 2008):

$$U_r = \frac{U - U_{icd50}}{U_{cd50} - U_{icd50}} > 0 \quad (2.15)$$

$$U_{icdx} = 0,645 \left(\frac{d_x}{b}\right)^{0,053} U_{cdx} \quad (2.16)$$

onde U_{icdx} = velocidade de aproximação necessária para iniciar o processo de erosão junto ao pilar para material com granulometria d_x .

$$U_{cdx} = 6,19 y^{1/6} d_x^{1/3} \quad (2.17)$$

e U_{cdx} = Velocidade de início de erosão em leitos construídos por materiais com diâmetro d_x .

Os valores do coeficiente de forma do pilar já foram apresentados na Tabela 2.1.

O fator K_θ que representa o coeficiente do ângulo de incidência do escoamento no pilar é obtido através da Tabela 2.2 onde l representa o comprimento do pilar.

Tabela 2.2 Valores do fator do coeficiente do ângulo de incidência do escoamento.

Ângulo	$l/b=4$	$l/b=8$	$l/b=12$
0	1,0	1,0	1,0
15	1,5	2,0	2,5
30	2,0	2,75	3,5
45	2,3	3,3	4,3
90	2,5	3,9	5,0

O coeficiente de configuração de fundo K_{cf} é caracterizado na Tabela 2.3 para diferentes tipos de configuração de fundo.

Tabela 2.3 Valores do fator K_{cf} para diferentes configurações de fundo.

Configuração de fundo	K_{cf}
Leito fixo	1,1
Leito plano com anti-dunas	1,1
Dunas pequenas	1,1
Dunas médias	1,2
Dunas grandes	1,3

Para valor do coeficiente K_e é necessário recorrer às seguintes expressões:

- Se $D_{50} < 2$ mm ou $D_{95} < 20$ mm $\rightarrow K_e = 1,0$
- Se $D_{50} \geq 2$ mm ou $D_{95} \geq 20$ mm $\rightarrow K_e = 0,4 \times u_R^{0,5}$

2.3.3 Equação proposta por Melville e Dongol (1992) para o efeito dos detritos na cavidade de erosão

Melville e Dongol (1992) indicaram que uma massa de detritos localizada na superfície da água junto a um pilar circular isolado pode ser avaliada utilizando um diâmetro efetivo para o pilar, que contabiliza o efeito conjunto do pilar e dos detritos, numa equação de previsão da erosão local em pilares. A equação proposta por Dongol (1989) e Melville e Dongol (1992), presente no livro *Bridge Scour*, permite obter um diâmetro equivalente do pilar, D_e , que contabiliza o efeito dos detritos nas cavidades de erosão e a partir daí poder-se-á utilizar qualquer um dos métodos apresentados neste ponto.

Todas as equações de previsão existentes na literatura para estimar a profundidade máxima de cavidades de erosão em pilares utilizam a sua largura como um dos fatores. Intuitivamente, a acumulação de detritos junto ao pilar faz com que este pareça mais largo no campo de escoamento, aumentando assim a área total obstruída (Lagasse *et al.*, 2010).

Dongol (1989) e Melville e Dongol (1992) através de um estudo em laboratório sobre a profundidade de erosão junto de um pilar cilíndrico com a presença de detritos propuseram a Equação (2.18). Os detritos foram modelados como um cilindro circular impermeável, concêntrico ao pilar e com sua superfície superior ao nível da superfície da água. Eles propuseram a seguinte expressão para o diâmetro equivalente do pilar, b_e , circular uniforme que induz aproximadamente a mesma profundidade de erosão que o pilar real com acumulação de detritos (Melville e Coleman, 2000):

$$b_e = \frac{0,52T_d b_d + (h - 0,52T_d)b}{h} \quad (2.18)$$

onde T_d e b_d são a espessura e largura de detritos flutuantes, respetivamente; e b a largura do pilar. Estas dimensões estão representadas de forma esquemática na Figura 2.13 a). A largura equivalente pode, portanto, ser usada para estimar a profundidade de erosão local onde os detritos estão presentes, se as dimensões da acumulação provável de detritos puderem ser estimadas.

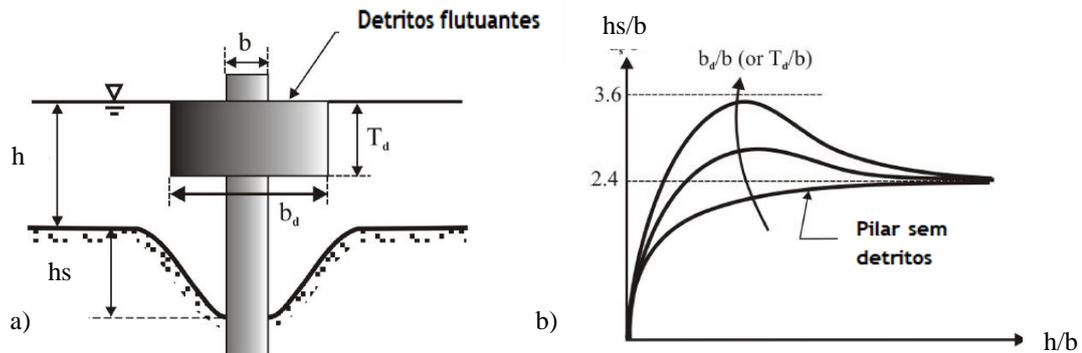


Figura 2.13 a) Desenho esquemático com as dimensões dos detritos; b) variação da profundidade de erosão com a dimensão dos detritos flutuantes (Adaptado de Melville e Coleman, 2000).

Na Figura 2.13 b) é possível analisar a variação da profundidade de erosão em função da dimensão dos detritos flutuantes. A sua análise sugere que a erosão atinge o seu pico quando $h/b \approx 4$. Para valores maiores de h/b , a tendência parece atingir o valor da erosão de equilíbrio sem acumulação de detritos $h_s/b = 2,4$.

CAPÍTULO 3 - Modelação numérica

3.1 Introdução

A modelação numérica de fluidos, usualmente denominada de Dinâmica de Fluidos Computacionais – CFD (designada por *Computational Fluid Dynamics* na literatura de língua inglesa) é o ramo da mecânica dos fluidos responsável pela simulação numérica dos fenómenos que ocorrem num determinado escoamento. A abordagem recorrendo ao CFD emergiu na década de 50 aplicada a diferentes áreas do conhecimento e notou-se uma intensificação dessa prática nos últimos 30 anos. Os constantes avanços tecnológicos e o aparecimento de computadores mais rápidos e capazes de dar resposta às exigências de processamento e armazenamento de dados, permitiu, através do recurso ao CFD, obter soluções de problemas mais complexos. Problemas esses em que a sua resolução, sem auxílio de programas computacionais, seria extremamente difícil, dado o elevado número de variáveis utilizadas para traduzir os diferentes fenómenos em estudo (Anderson, 1995). No entanto, e de modo a legitimar que estes modelos reproduzirem corretamente a realidade, torna-se necessário a sua validação por comparação com valores medidos em protótipo (Nunes, 2017).

Atualmente, os modelos CFD têm uma ampla utilização na indústria e na investigação científica, especialmente na engenharia aeroespacial, hidráulica e marítima (Silva, 2013). Apresentam-se, a título ilustrativo, dois exemplos de aplicação na área da hidráulica, na Figura 3.1 o exemplo de um descarregador de cheia e na Figura 3.2 o exemplo de uma cavidade de erosão junto de um pilar.

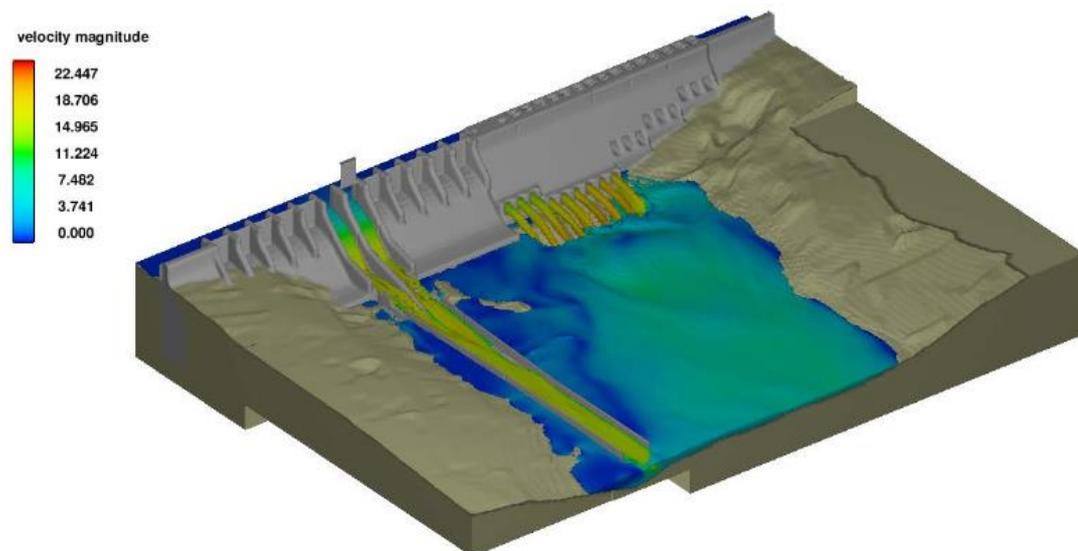


Figura 3.1 Descarregador de cheia (Brethour e Burnham, 2010).

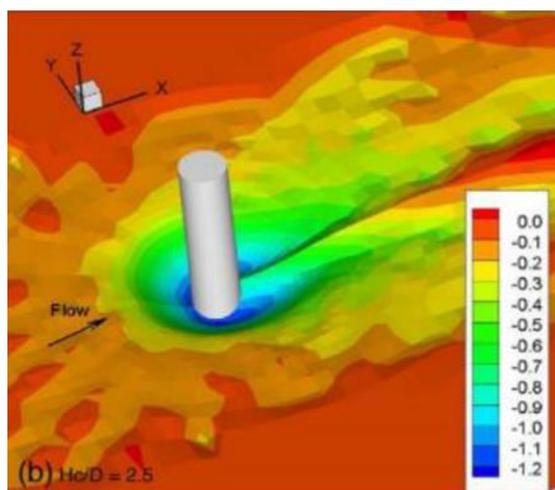


Figura 3.2 Resultado da simulação da cavidade de erosão após 3 horas de simulação (Zhao *et al.*, 2010).

Para solucionar problemas da mecânica dos fluidos existem três técnicas, a experimental sendo a mais realista, a teórica que é mais geral e a numérica onde não há restrições à linearidade, resolvendo geometrias e processos mais complexos, apresentando uma evolução temporal do processo (Fortuna, 2000).

Dentro dos modelos CFD existem diferentes códigos numéricos, tais como: o FLOW-3D, CFX, o FLUENT, OpenFOAM, entre outros. Na presente dissertação o código numérico escolhido foi o FLOW-3D por apresentar uma variedade de opções físicas e numéricas que permitem a modelação de escoamentos em superfície livre com grande precisão, este software foi desenvolvido pela Flow Science, Inc.

Este capítulo está subdividido em quatro subcapítulos, sendo o primeiro introdutório. No segundo subcapítulo apresentam-se as equações governativas, ou seja, as equações necessárias para a formulação matemática do escoamento em estudo; no terceiro subcapítulo, apresentam-se os modelos de turbulência para as equações governativas do tipo equações médias de Reynolds com base nas equações de Navier-Stokes (RANS), bem como os modelos presentes no software utilizado de uma forma mais abrangente, e mais sucintamente o modelo que vai ser alvo de estudo no presente trabalho, sendo este o modelo $k-\epsilon$ RNG (renormalizado); por fim, no quarto subcapítulo, está presente uma breve introdução ao software FLOW-3D bem como os métodos presentes neste, como o método dos volumes finitos, o método VOF, a malha de cálculo, o método FAVORTM e por fim as condições iniciais e de fronteira.

3.2 Equações governativas

O princípio básico do CFD passa por subdividir o escoamento em pequenos elementos, constituindo uma malha de volumes finitos. A este elemento é aplicado um conjunto de equações resultante de três princípios governativos da dinâmica de fluidos (Anderson, 1995):

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

O movimento dos fluidos pode ser descrito por um conjunto de equações diferenciais não-lineares conhecidas como as equações de Navier-Stokes. Estas equações decorrem da aplicação da lei de conservação de massa e da equação da conservação da quantidade de movimento.

A equação da continuidade, constituindo a forma diferencial da lei da conservação da massa escrita em termos de campo de escoamentos, toma a forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

em que: t o tempo, ρ é a massa volúmica do fluido, $\vec{\nabla}$ é o operador nabla e \vec{u} é o vetor velocidade.

Em notação tensorial, a equação da continuidade vem:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.2)$$

Sendo x_i ($i = 1, 2, 3$) as componentes das coordenadas cartesianas e u_i ($i = 1, 2, 3$) a componente do vetor da velocidade na direção i . No caso de escoamentos permanentes ($\partial \rho / \partial t = 0$) e fluidos incompressíveis ($\rho = \text{constante}$) a equação da continuidade apresenta a sua forma mais simples:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

em que u, v, w , são as componentes do vetor velocidade segundo os eixos x, y, z , respetivamente.

Ao relacionar o conjunto de forças externas com as grandezas de massa e de aceleração do seu movimento estamos a falar da segunda lei de Newton, esta lei é aplicada a um elemento de fluido na sua forma diferencial. Ao substituir o tensor das tensões viscosas pela relação constitutiva entre a tensão e a taxa de deformação para fluidos Newtonianos e isotrópicos, a equação de Navier-Stokes para um fluido de viscosidade, μ , vem escrita (Azevedo, 2011):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + f \quad (3.4)$$

Onde $\mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j}$ são as tensões devido à viscosidade, f as forças de massa e o primeiro membro da equação diz respeito à mudança média na quantidade de movimento devido à instabilidade média no escoamento e à convecção média do escoamento.

Para um fluido incompressível e Newtoniano as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (3.5)$$

Na Equação 3.5 o primeiro membro da equação representa a variação da quantidade de movimento média do fluido, como já foi repetido anteriormente, esta variação é devido à ação de várias forças tais como, a variação da pressão, a variação de tensões viscosas e ainda as variações de tensão aparente $(-\overline{\rho u'_i u'_j})$ devido ao campo de velocidade flutuante, geralmente referidas como as tensões de Reynolds. Como o número de incógnitas ultrapassa o de equações para as determinar, 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 (Azevedo, 2011).

3.3 Modelos de turbulência

Um estado de escoamento do fluido no qual as variáveis instantâneas exibem flutuações irregulares e aparentemente aleatórias caracteriza-se de turbulência. Estas flutuações misturam as grandezas transportadas tais como a quantidade de movimento e a energia e fazem com que os fenómenos de transporte sejam dificultados.

Para números de Reynolds elevados, as instabilidades naturais que ocorrem dentro do escoamento não são atenuadas e manifestam-se na formação de vórtices de vários tamanhos. A turbulência está presente no escoamento e não pode ser ignorada na sua modelação numérica. Idealmente, seria possível simular, com as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, todo o espectro de flutuações turbulentas. Isso é possível somente se a resolução da malha for suficiente para capturar tais detalhes.

No entanto, isso geralmente não é possível devido à memória do computador e às limitações de tempo de processamento. Portanto, será necessário recorrer à modelação simplificada que descreve os efeitos da turbulência nas características médias do escoamento (FLOW-3D Documentation, 2016). Do ponto de vista físico, matemático e numérico as simplificações feitas na análise dos efeitos da turbulência são extremamente vantajosas. A procura de tais simplificações é um objetivo principal no desenvolvimento de novos modelos de turbulência (Morais, 2015).

No que diz respeito às soluções numéricas, os modelos de turbulência permitem resolver o sistema de equações do escoamento, estabelecendo expressões para as tensões de Reynolds. Estes modelos de turbulência são importantes na engenharia pois permitem determinar como a turbulência afeta as características médias do escoamento (Silva, 2013).

Uma simulação de dinâmica dos fluidos é uma Simulação Numérica Direta (DNS - *Direct Numerical Simulation*), onde as equações de Navier-Stokes são resolvidas numericamente, sem qualquer modelo de turbulência, devido a este facto toda a gama de escalas temporais e espaciais da turbulência devem ser resolvidas, mas o custo computacional de DNS é muito elevado, mesmo quando os escoamentos são de baixo número de Reynolds. A resolução das equações de Navier-Stokes é tao complexa que só é viável obter uma solução analítica para escoamentos muito simples, para os restantes casos é necessária uma solução computacional, exigindo uma capacidade de armazenamento e velocidade de cálculo extraordinárias (Ramos, 2012).

A resolução direta das equações de Navier-Stokes apresenta-se inviável para escoamentos turbulentos onde o número de Reynolds é bastante elevado para tais equações foram desenvolvidos vários modelos, normalmente divididos em dois grandes grupos, as RANS (designado por *Reynolds Averaged Navier-Stokes* em terminologia inglesa) e LES (designado por *Large Eddy Simulation* em terminologia inglesa) (Ramos *et. al.*, 2012).

Os modelos cuja base são as RANS, não têm capacidade para resolver a totalidade das escalas de turbulência. A solução adotada é a modelação de todas as escalas como uma única escala média, que representa toda a turbulência. São vários os modelos com classificações quanto ao modo como se obtêm as tensões de Reynolds, no entanto, os mais utilizados são os modelos lineares de viscosidade turbulenta de duas equações. O objetivo destes modelos é o cálculo das tensões de Reynolds, a partir do método RANS (Ramos, 2012). Atualmente, os modelos de turbulência RANS mais aplicados são os modelos lineares de viscosidade turbulenta de duas equações. 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 $k-\epsilon$) ou da dissipação específica (modelo $k-\omega$) (Azevedo, 2011).

Enquanto na metodologia LES, o modelo parte do princípio de que os movimentos nas menores escalas tendem a ser mais homogéneos 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 (Bonoa *et al.*, 2011). 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 (Anderson, 1995). Os resultados originários deste modelo são dependentes do tempo e do cálculo disponível, por isso é importante lembrar que o modelo é intrinsecamente tridimensional. Para além disso, as flutuações devem ser inicialmente introduzidas e/ou dever-se-á indicar os limites de vazão para

o cálculo. Este modelo precisa de mais esforço e capacidade de cálculo pois apresenta um cálculo mais pormenorizado, o que é bom pois isso proporciona uma obtenção de informações mais precisas do que as produzidas por modelos baseados na média de Reynolds (Brandão, 2015).

Como se pode constar na Figura 3.3, os modelos RANS são menos exigentes computacionalmente do que as DNS e os modelos LES, por permitirem obter soluções para as propriedades médias (Nunes, 2017 e Rezende, 2009).

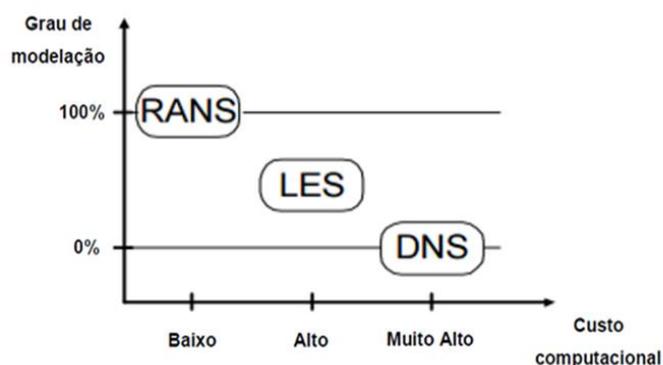


Figura 3.3 Grau de modelação e custo computacional de modelos de turbulência (adaptado de Rezende, 2009).

Reconhece-se que nenhum dos modelos de turbulência é aceite universalmente como sendo o mais adequado para todos os problemas. Escolher um modelo de turbulência depende de vários fatores como as características do escoamento, a prática estabelecida para a classe de problema específico, o nível de precisão necessário, os recursos computacionais e o tempo que se pode despendar para as simulações (Canilho, 2016).

Na presente dissertação optou-se pelo modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG para a simulação pois este modelo é mais preciso e fiável para um amplo tipo de escoamentos. Este modelo surgiu de alterações feitas ao modelo $k-\varepsilon$ padrão e devido a essas alterações, as incertezas nas previsões devido a erros de discretização numérica são sistematicamente minimizados (Azevedo, 2011). Geralmente, o modelo RNG tem aplicabilidade mais ampla que o modelo padrão. Em particular, o modelo RNG é conhecido por descrever escoamentos de turbulência de baixa intensidade e escoamentos tendo regiões de corte mais gravosas, seguidamente são apresentadas as características deste modelo (FLOW-3D Documentation, 2016).

Modelo $k-\varepsilon$ RNG (renormalizado)

O modelo $k-\varepsilon$ tradicional ou padrão é um modelo bastante utilizado, mas possui uma capacidade limitada em escoamentos com rápida distorção, e prediz uma viscosidade turbulenta excessiva

o que faz com que a quantidade de movimento seja muito difusa (Abrunhosa e Nieckele, 2004). As alterações efetuadas no modelo k - ε padrão com o objetivo de melhorar os pontos fracos deste modelo, deram origem ao modelo k - ε RNG (designado por Renormalization Group Method em terminologia inglesa), neste modelo desenvolveram uma técnica estatística bastante rigorosa, este método renormaliza as equações de Navier-Stokes, para explicar os efeitos de menor escala de movimento (Azevedo, 2011). Em comparação com o modelo k - ε padrão o modelo RNG em teoria é mais preciso e confiável, para uma classe mais ampla de escoamento (Pereira, 2010). O modelo k - ε RNG apresenta também deficiências apesar de ser teoricamente mais avançado (Azevedo, 2011).

O modelo k - ε RNG é muito semelhante ao nível de forma das equações de transporte do modelo k - ε padrão. As equações de transporte estão escritas de seguida (Canilho, 2016):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.6)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.7)$$

Onde, G_k é a produção de energia cinética turbulenta devido ao gradiente de velocidades médias, G_b a produção de energia cinética turbulenta devido às flutuações, Y_M reproduz a contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação global.

A viscosidade turbulenta é representada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

As constantes apresentam os valores seguintes:

$$C_{1\varepsilon} = 1,42, \quad C_{2\varepsilon} = 1,68, \quad C_\mu = 0,0845, \quad \sigma_k = 0,7194, \quad \sigma_\varepsilon = 0,7194$$

Para o modelo k - ε a principal diferença é o termo adicional na equação ε , este é dado por:

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_o)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.9)$$

Onde, $\eta = \frac{S k}{\varepsilon}$, $\beta = 0,012$ e $\eta_o = 4,38$.

Para os modelos de duas equações $k - \epsilon$ e RNG existe um desafio numérico que é a necessidade de limitar o valor mínimo da equação ϵ (taxa de dissipação). Esta equação poderá gerar valores de ϵ muito próximos de zero e embora fisicamente se deva aproximar de zero, por razões numéricas este caso pode não ser possível. Por estas razões, este valor poderá ser limitado automaticamente quando se dá o caso de a convergência ser muito lenta (FLOW-3D Documentation, 2016).

3.4 Modelação numérica em FLOW-3D

A construção de modelos computacionais para a simulação de escoamento de fluidos requer do utilizador conhecimento acerca de três áreas principais onde assentam todos os modelos CFD, dinâmica de fluidos, matemáticas e ciências da computação.

Permitindo suprimir trabalhos exaustivos de programação foram criados softwares que, tendo por base equações matemáticas que representam fenómenos físicos, facilitam a simulação de problemas reais de escoamento. Desta forma, cabe ao utilizador escolher o software que melhor se adequar ao problema que pretende analisar. Desenvolvido pela Flow Science, Inc., o software FLOW-3D, para além de se basear na solução das equações RANS, apresenta uma capacidade de modelar escoamento em superfície livre com precisão, uma vez que o software foi desenvolvido para representar problemas transitórios (dependentes do tempo) em uma, duas ou três dimensões (Silva, 2013). Dadas as características do software FLOW-3D foi escolhido como o mais adequado, no âmbito dos objetivos propostos para a presente dissertação, por apresentar elevada capacidade de modelar escoamento em superfície livre com precisão, essencial para o modelo de escoamento junto de pilares de pontes na presença de detritos.

O FLOW-3D é um software de dinâmica de fluidos computacional de uso geral (CFD). Emprega técnicas numéricas especialmente desenvolvidas para resolver as equações de movimento de fluidos, para obter soluções transientes e tridimensionais para problemas de escoamento multifásica em várias escalas. O movimento do fluido é descrito com equações diferenciais não lineares, transitórias e de segunda ordem. As equações de fluido do movimento devem ser empregues para resolver essas equações. Uma solução numérica dessas equações envolve a aproximação dos vários termos com expressões algébricas. As equações resultantes são então resolvidas para produzir uma solução aproximada para o problema original. Um conjunto de opções físicas e numéricas permite que os usuários apliquem o FLOW-3D a uma ampla variedade de fenómenos de escoamento de fluidos e transferência de calor (FLOW-3D Documentation, 2016).

O FLOW-3D pode ser operado em vários modos correspondentes a diferentes casos de limitação das equações gerais de fluido. Por exemplo, um modo é para fluidos compressíveis, enquanto

outro é para situações de fluidos puramente incompressíveis. Neste último caso, a densidade e a energia do fluido podem ser consideradas constantes e não precisam ser calculadas. A superfície livre pode ser incluída no modo incompressível de um fluido. Esses modos de operação correspondem a diferentes escolhas para as equações governativas do movimento (FLOW-3D Documentation, 2016).

Superfície livre existe em muitas simulações realizadas com o FLOW-3D. É desafiador modelar superfícies livres em qualquer ambiente computacional porque os parâmetros de fluxo e as propriedades dos materiais, como densidade, velocidade e pressão, experimentam uma descontinuidade nele. A superfície livre torna-se um dos limites externos do líquido. Uma definição adequada das condições de contorno na superfície livre é importante para uma captura precisa da dinâmica da superfície livre (FLOW-3D Documentation, 2016).

3.4.1 Método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos que advém do método original das diferenças finitas é empregue no FLOW-3D que resolve numericamente as equações da dinâmica de fluidos utilizando esse método. Um domínio é subdividido numa malha de células hexaédricas fixas. Em cada célula da malha os valores médios das variáveis dependentes do escoamento são consideradas localizadas no centro das células, à restrição da velocidade que se encontra localizada nas respetivas faces, como pode ser observado na Figura 3.4. Uma célula da malha de cálculo poderá ser identificada por um único índice n-dimensional, que no caso de malhas tridimensionais é representado por (i,j,k) (Silva, 2013).

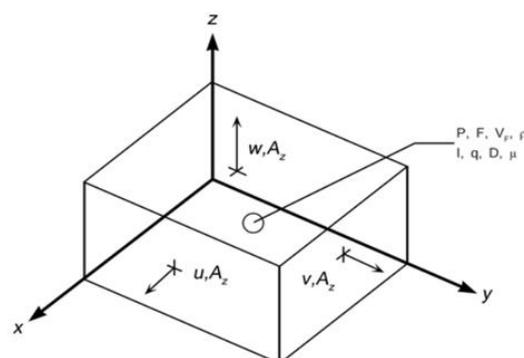


Figura 3.4 Localização das variáveis numa célula de cálculo (FLOW-3D Documentation, 2016).

O Método dos Volumes Finitos (MVF) utiliza como ponto inicial a forma integral da equação de conservação aplicado ao volume de controlo (VC), sendo este o elemento da malha em que transformou o domínio da solução, à qual se aplica o conceito da continuidade. Este método pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, adaptando-se a geometrias complexas, mas a

malha define apenas as fronteiras do volume de controlo e não necessita estar relacionada com um sistema de coordenadas. Este modelo torna-se de fácil compreensão, pois todos os termos que precisam de ser aproximados tem significado físico (Gonçalves, 2007).

Para cada VC, as tensões de superfície, forças de massa e fluxos de superfície, podem ser calculadas em função dos valores das variáveis envolventes. De um modo geral, no método dos volumes finitos o algoritmo numérico compreende os seguintes passos (Silva, 2013):

- Integração das equações fundamentais da dinâmica de fluidos para todos os volumes de controlo do domínio da solução;
- Discretização, envolvendo a substituição de termos representativos de processos de escoamento tais como a convecção, difusão e produção nas equações fundamentais, por aproximações numéricas. Para sistemas de equações algébricas este processo converte as equações da forma integral;
- Resolução de equações algébricas por processos iterativos.

A vantagem passa por a malha não necessitar estar relacionada com um sistema de coordenadas e como desvantagem do método de volumes finitos em relação ao método das diferenças finitas tem-se a dificuldade de desenvolver em 3D métodos de segunda ordem (ou superiores) quando se utilizam malhas não estruturadas. Isto deve-se ao facto da aproximação por volumes finitos requerer três níveis de aproximação, a interpolação, diferenciabilidade e a integração (Gonçalves, 2007).

3.4.2 Método *Volume of Fluid* (VOF)

O método VOF permite resolver um limite de superfície livre dentro de uma célula de malha computacional e definir condições de contorno na célula de acordo com a quantidade de fluido na mesma e a orientação da superfície (FLOW-3D Documentation, 2016).

No FLOW-3D a superfície livre do escoamento é modelada através do método VOF (*Volume of Fluid*), este método utiliza a função de fração de fluido, F , para a localização da superfície livre. Para o caso de mais comum do escoamento de um único fluido, é definida como sendo unitária, quando na célula apenas se tem fluido, e nula na ausência deste. O valor da função F estará assim entre o intervalo $[0,0;1,0]$, como representada na Figura 3.5. No intervalo entre os casos extremos apresentados é onde se localiza a superfície livre (Nunes, 2017).

O volume de fluido F_{vol} numa célula de calculo é dado por (Silva, 2013):

$$F_{vol} = F V_f dx dy dz \quad (3.10)$$

onde V_f é o volume de fluido que descreve as condicionais geométricas do escoamento.

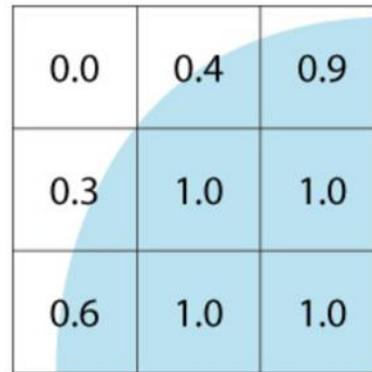


Figura 3.5 Exemplo da distribuição da função F perto da superfície livre (Nunes, 2017).

3.4.3 Malha de Cálculo

Quem fornece os meios para a definição dos parâmetros de fluxo em locais discretos, ajustando as condições geométricas e, naturalmente, o desenvolvimento de aproximações numéricas das equações de movimento de fluido é a malha de cálculo. A abordagem do programa FLOW 3D é subdividir o domínio total do escoamento numa malha constituída por células retangulares (FLOW-3D Documentation, 2016).

Uma malha computacional caracteriza o espaço físico. Desta forma, cada parâmetro de fluido é representado numa malha por uma matriz de valores, caracterizando pontos discretos. Uma vez que os parâmetros físicos reais variam continuamente no espaço, quanto menor o espaçamento da malha, melhor e maior será a precisão da simulação. Assim obtém-se uma propriedade fundamental de uma aproximação numérica: qualquer aproximação numérica válida aproxima-se tanto mais das condições originais quanto menor o espaçamento da malha utilizada. Se uma aproximação não satisfizer esta condição, então ela deve ser considerada incorreta (Brandão, 2015).

A redução do espaçamento da grelha, ou refinamento da malha, para os mesmos resultados de espaço físico é vantajoso a nível de precisão, no entanto aumenta a dimensão do modelo computacional e por consequência o tempo de cálculo do mesmo. Alcançar um compromisso entre satisfazer essas restrições e obter soluções precisas pelo utilizador é um ato de equilíbrio que é uma arte não menor do que o desenvolvimento do modelo CFD propriamente dito (FLOW-3D Documentation, 2016).

As malhas de cálculo são muito fáceis de gerar e armazenar devido à sua natureza regular ou estruturada. Um afastamento da malha não uniforme adiciona flexibilidade ao combinar domínios complexos a diferentes escoamentos também complexos. As células computacionais são numeradas de forma consecutiva usando três índices: i na direção x , j na direção y e k na direção z . Desta forma, cada célula de uma malha tridimensional pode ser identificada por um único endereço (i, j, k) , semelhante às coordenadas de um ponto no espaço físico. O FLOW-3D

usa uma malha ortogonal definida em coordenadas cartesianas ou cilíndricas. As geometrias mais complexas são modeladas por recurso a um método denominado de FAVOR™ (FLOW-3D Documentation, 2016). Na Figura 3.6 apresentam-se dois exemplos de malhas em 2D e 3D.

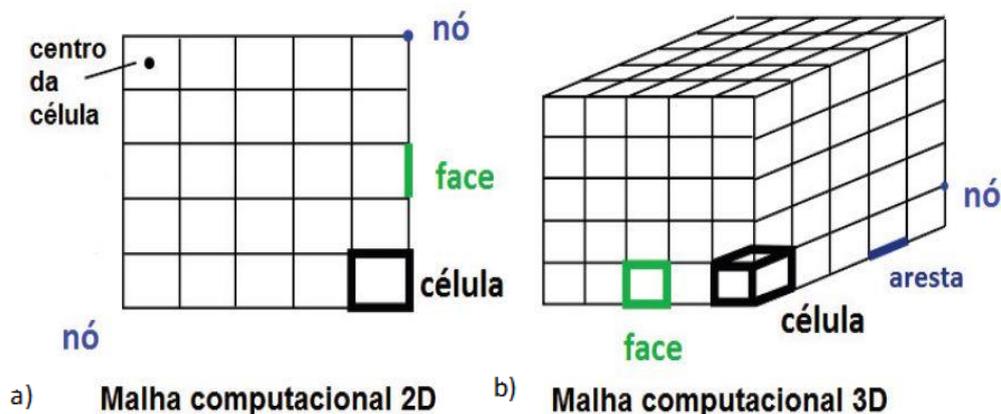


Figura 3.6 Malha de células de cálculo: a) bi; b) tri-dimensional (adaptado de Bakker, 2006a).

3.4.4 Método FAVOR™

O método *Fractional Area-Volume Obstacle Representation* (FAVOR™) é utilizado no FLOW-3D e permite a representação de geometrias mais complexas, numa malha estruturada e retangular, com bastante rigor. Esta técnica incorpora a geometria na malha criando frações de áreas/volumes parciais para cada célula recorrendo à determinação dos pontos da face de uma dada geometria que intersejam os vértices da célula de cálculo, sendo assumidas conexões em linha reta (ou num plano, no caso de uma simulação 3D) entre os pontos de interseção (Nunes, 2017).

O processo de entrada de dados de um problema de escoamento constitui o pré-processador, as etapas deste são as seguintes (Tiago, 2011):

- Definir a geometria da área de interesse - domínio computacional;
- Gerar a malha - ou seja a subdivisão do domínio em subdomínios menores, sem que estes se sobreponham - malha de células;
- Seleção dos fenómenos físicos e químicos que precisam ser modelados;
- Definição das propriedades dos fluidos;
- Especificação das condições iniciais e de fronteiras adequadas ao problema e ao domínio definido.

O facto de este método se tratar de um método discreto, a sua eficiência é afetada pela resolução da malha computacional adotada. Isso advém do facto do pré-processador gerar frações de área para cada uma das faces das células. Após gerar estas frações o pré-processador determina quais os cantos da face da célula que estão dentro da geometria definida. Se todos os quatro cantos de uma face de uma célula estão no interior da geometria, toda a face é definida como estando dentro dessa mesma geometria. Da mesma forma, se todos os cantos estiverem afastados, entende-se que toda a face está fora da geometria. Quando apenas uma parte dos cantos de uma célula estão no interior da geometria, a interseção da geometria é calculada computacionalmente. As frações de área são então calculadas a partir desses pontos de interseção sendo assumidas conexões em linha reta entre pontos de interseção dentro da face. A suposição de uma ligação reta poderá introduzir um pequeno erro na fração de área. A aproximação é consistente com os outros pressupostos no desenvolvimento das equações e melhora quanto maior for o refinamento da malha de cálculo (FLOW-3D Documentation, 2016).

A implicação deste método numérico é a de que a precisão é tanto menor quanto maior a dimensão da célula, célula que é resultado do espaçamento adotado para a malha de cálculo. Por exemplo, um pequeno objeto esférico (menor do que uma célula de malha) não será gravado a não ser que se estenda através de uma face de uma célula mas que não inclui nenhum canto dessa célula na sua face, não irá ser reconhecida pela fração de área, como ilustrado para o círculo no canto inferior direito da Figura 3.7. Para algumas geometrias e resoluções de malha é possível que a geometria possa interseccionar uma face de uma célula mais de uma vez. Neste caso, o limite da célula correspondente é assumida como estando totalmente dentro do objeto ou totalmente fora. A representação é melhorada à medida que a resolução de malha é aumentada isto é, o tamanho da célula diminui (FLOW-3D Documentation, 2016).

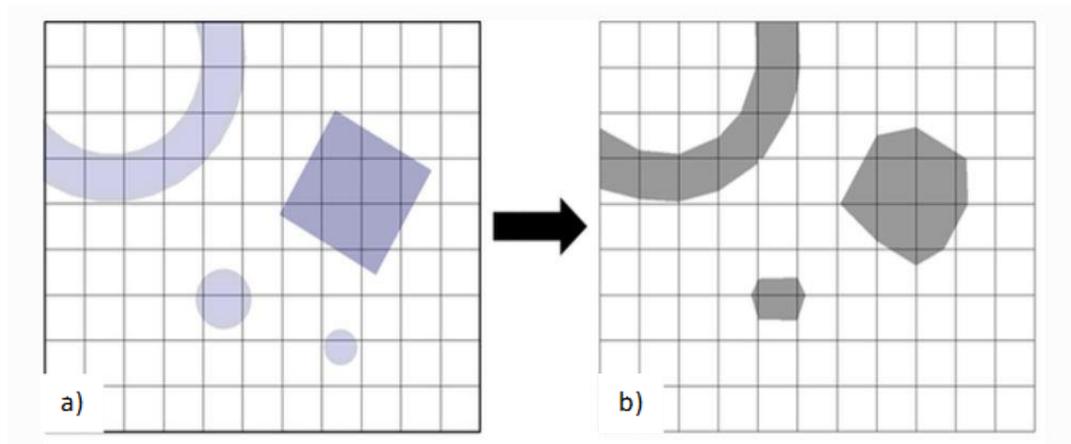


Figura 3.7 a) Definição do objeto; b) objeto criado (FLOW-3D Documentation, 2016).

3.4.5 Condições iniciais e de fronteira

As condições iniciais definem as condições iniciais na simulação. O estado inicial da solução para problemas de escoamentos transitória de fluido deve ser conhecido para encontrar uma solução e, de maneira semelhante ao que é feito com condições de fronteira, as condições iniciais são assumidas, aproximando-se do verdadeiro estado no tempo $t = 0$. A precisão das condições iniciais é um pouco menos importante do que a das condições de fronteira, porque o seu efeito é reduzido com o passar do tempo. Devido a esse efeito, é comum definir a geometria inicial do fluido com razoável precisão, mas assumir que os campos de pressão e velocidade são uniformes. Isso normalmente produz bons resultados com um tempo relativamente curto, em que a solução é afetada pelas condições iniciais físicas. As condições iniciais no FLOW-3D podem ser definidas em escala global ou em regiões mais localizadas (FLOW-3D Documentation, 2016).

As equações que governam o movimento do escoamento podem ser categorizadas como problemas de valor de limite inicial, o que significa que a solução deve ser conhecida no tempo inicial e nos limites a fim de ser encontrada. Esse paradoxo é tratado assumindo-se a solução nos limites (definindo as condições de fronteira) e o tempo inicial (condições iniciais). Isso implica que a solução do problema é fundamentalmente definida pelo que é assumido nos limites. Portanto, é muito importante que a solução assumida no limite seja uma boa aproximação neste local (FLOW-3D Documentation, 2016).

As condições de fronteira, associadas à geometria são tratadas pela escolha do tipo de componente ou por meio de outras propriedades específicas do componente que estão associadas a um modelo físico / equação específico. No entanto, as condições de fronteira nas faces de cada bloco de malha também precisam ser definidas. No FLOW-3D® existem dez tipos de condições de fronteira diferentes para a definição das seis condições de fronteira de cada bloco de malha: pressão específica, caudal específico, escoamento, continuidade, simetria, parede, grade de sobreposição, condição periódica de fronteira, periódico e ondas, sendo de seguida apresentadas as características de algumas delas mais relevantes para esta dissertação (FLOW-3D Documentation, 2016):

- Continuidade (*Continuative - C*) - Em muitas simulações, é necessário que o fluido escoe um ou mais limites do domínio computacional. Em tais limites de “saída” surge a questão do que constitui uma boa condição de fronteira. A condição de saída mais simples e mais comumente usada é a de um limite “contínuo”. Uma condição de fronteira contínua consiste em zero derivadas normais no limite para todas as quantidades. A condição derivada zero destina-se a representar uma continuação suave do escoamento através da fronteira. Deve ser enfatizado que a condição de fronteira contínua não tem base física; em vez disso, é uma afirmação matemática que pode ou não fornecer o comportamento de fluxo desejado.

- Saída de escoamento (*Outflow - O*) - nesta condição imposta ao escoamento existe uma saída de todo o caudal que interseja a fronteira de jusante, assegurando a inexistência de perturbações na distribuição de velocidades do escoamento.
- Pressão definida (*Specified pressure - P*) - Uma ferramenta muito útil é a capacidade de especificar uma condição de pressão em uma ou mais fronteiras de uma região computacional. Os limites de pressão representam condições ambientais de laboratório e pressões aplicadas decorrentes de dispositivos mecânicos. Geralmente, uma condição de pressão não pode ser usada numa fronteira onde as velocidades também são especificadas, porque as velocidades são influenciadas por gradientes de pressão. A única exceção é quando as pressões são necessárias para especificar as propriedades do fluido, por exemplo, densidade cruzando um limite através de uma equação de estado. Normalmente, existem dois tipos de condições de pressão, chamadas de condições estáticas ou de pressão de estagnação.
- Velocidade específica (*Specified velocity*) - é uma condição de fronteira que permite aduzir ao sistema o caudal, desde que se defina numa determinada fronteira. Este caudal é distribuído de forma uniforme por toda a fronteira.
- Simetria (*Symmetry - S*) - Aplica uma condição de gradiente zero no limite, bem como uma condição de velocidade zero normal ao limite, sendo que existe, portanto, uma simetria na fronteira que não influencia o escoamento no interior do domínio computacional.
- Parede (*Wall - W*) - Aplica uma condição de não deslizamento na interface entre um fluido viscoso e um sólido, bem como uma condição de velocidade zero normal ao limite.

CAPÍTULO 4 - Procedimento numérico

4.1 Introdução

Este capítulo destina-se a servir de orientação/guia a novos usuários onde se apresentam os principais componentes da Interface Gráfica do FLOW-3D e os procedimentos utilizados na configuração e na execução de várias simulações, como resultado da lacuna encontrada no decurso do presente trabalho de dissertação. Os novos usuários são aconselhados a trabalhar com todos os problemas e variações.

No presente capítulo será apresentada uma breve descrição de como navegar no Gerador de simulação (*Simulation Manager*) do FLOW-3D, ou seja, as características gerais do processo de simulação.

4.2 Características do processo de simulação

O código CFD FLOW-3D foi utilizado para simular o efeito que os detritos acumulados na face de montante de um pilar cilíndrico têm nas cavidades de erosão. Este software tem uma poderosa capacidade de simular o comportamento de líquidos e gases, direcionado para a solução de problemas transitórios de superfície livre e transporte de sedimentos. Ele usa um modelo de diferenças finitas para resolver as equações 3D de Navier-Stokes como já foi referido mais pormenorizadamente no Capítulo 3.

Utilizar o software FLOW 3D é, em muitos aspetos, semelhante à definição de uma experiência laboratorial. Se a experiência não estiver configurada corretamente para reproduzir uma situação real, os resultados não refletirão certamente essa situação. Da mesma forma, se o modelo numérico não representar com precisão a situação que se pretende reproduzir, os resultados não refletirão a situação em análise. É importante garantir que o problema que está a ser modelado represente, o mais próximo possível, a situação física real.

O procedimento deste processo numérico resume-se aos seguintes passos apresentados no seguinte fluxograma:

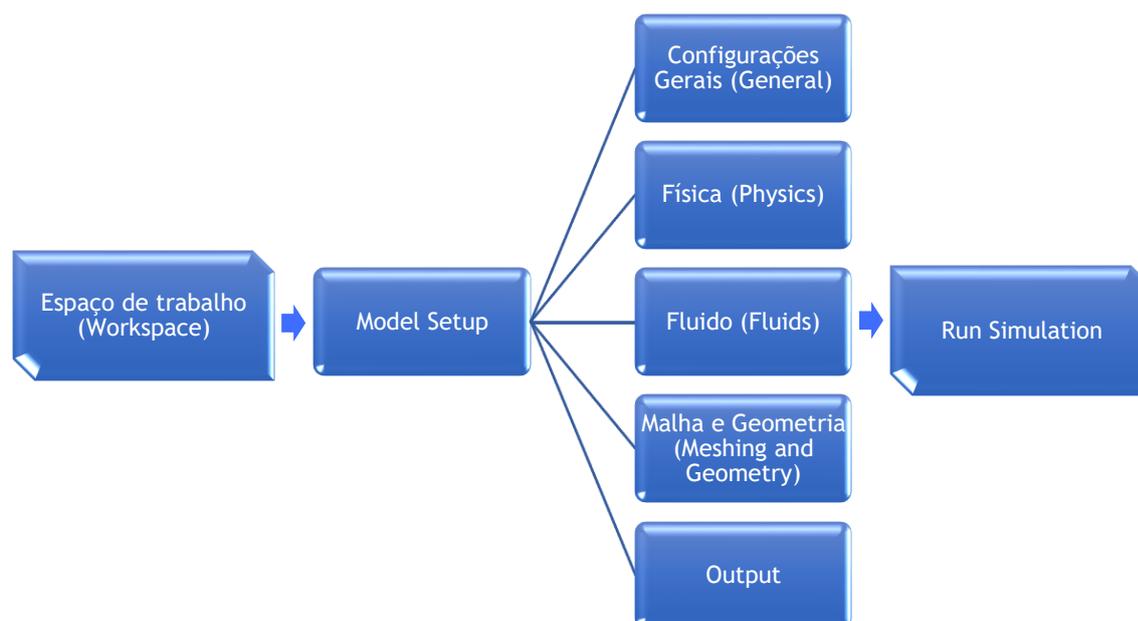


Figura 4.1 Fluxograma do método numérico

O gerador de simulação (*Simulation Manager*) é um guia no FLOW-3D que é utilizado principalmente para organizar e executar simulações bem como mostrar informações do estado das simulações em execução. Esta é a fase inicial da simulação, o primeiro passo é criar um novo espaço de trabalho (*New Workspace*), constituído essencialmente por pastas que contêm e organizam simulações. Na figura 4.2 apresenta-se o espaço de trabalho para a realização de uma simulação efetuada na presente dissertação.

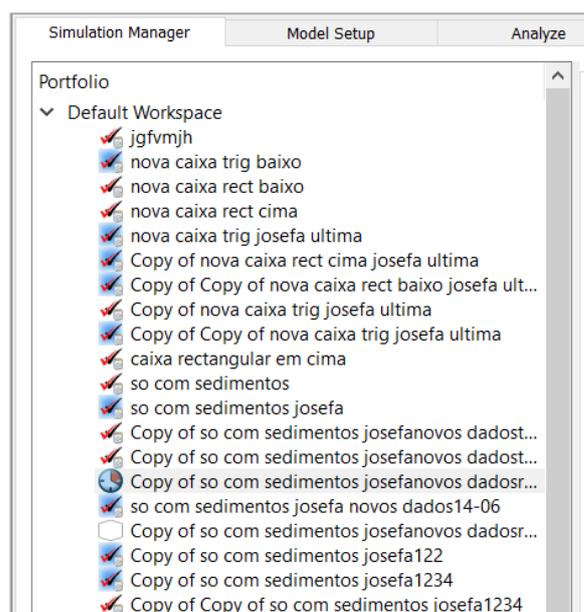


Figura 4.2 *New Workspace* (FLOW-3D Documentation, 2016).

Na etapa seguinte, que se denomina de *Model Setup*, realiza-se a configuração do modelo, ou seja é onde é definido os parâmetros de entrada para a simulação atualmente selecionada no *Simulation Manager*. Isso inclui configurações gerais, modelos de turbulência, fluidos, geometria, malha, propriedades dos componentes, condições iniciais, condições de fronteira e opções de saída.

Nas configurações gerais do modelo (*Model Setup*) é onde as configurações de simulação de alto nível são definidas, nomeadamente, a duração da simulação, o número de fluidos presentes no estudo, *etc.* Nas simulações realizadas definiu-se como tempo de simulação 14400 segundos, correspondendo a 4 horas de ensaio. Esta escolha reflete um compromisso entre o tempo de simulação computacional e a representatividade do desenvolvimento da cavidade de erosão. Neste sentido, a este tempo corresponde 3 dias de simulação e representa cerca de 70% da profundidade máxima da cavidade de erosão. Esta escolha encontra-se representada na Figura 4.3.

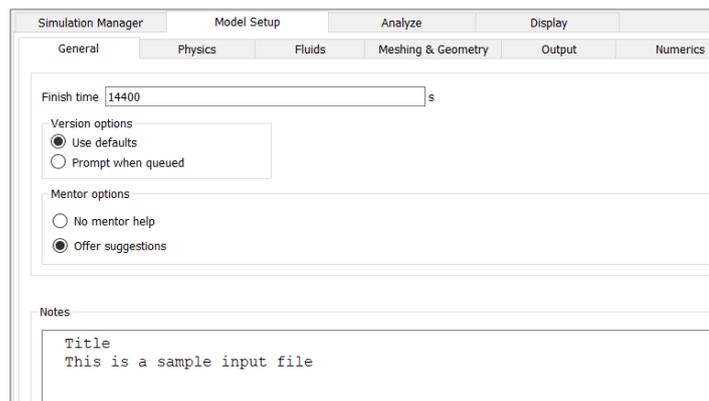


Figura 4.3 Configurações gerais (FLOW-3D Documentation, 2016).

Os mecanismos físicos relevantes ou os termos adicionais nas equações governantes são definidos no ponto Física. Para esta simulação é necessária a ativação dos seguintes modelos representados na Figura 4.4 e posteriormente apresentados com mais pormenor.

Avaliação de densidade presente na Figura 4.5: Este modelo explica as variações na densidade que criam a pluma térmica, automaticamente quando se define um sedimento (características apresentadas mais á frente) o programa assume uma densidade.

Gravidade e referencial não inercial presente na Figura 4.6: Este ponto adiciona os efeitos das forças de massa que representa a aceleração da gravidade, portanto, insere-se $-9,8 \text{ ms}^{-2}$, componente segundo Z.

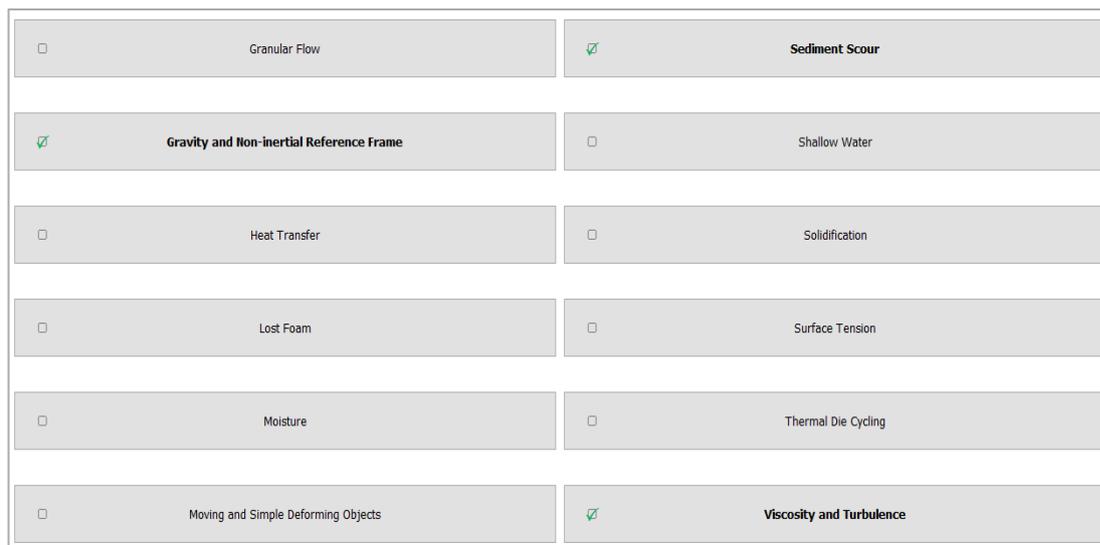


Figura 4.4 Ponto Física (FLOW-3D Documentation, 2016).

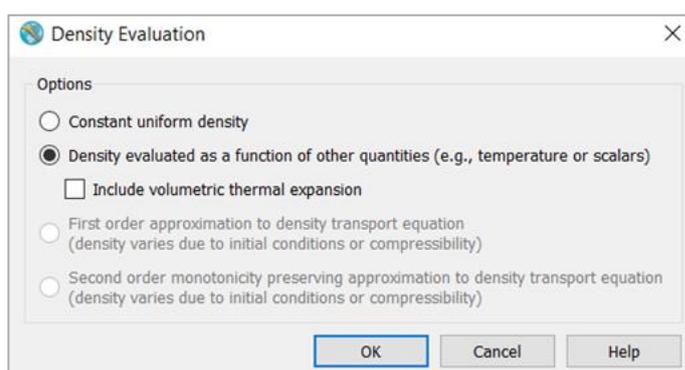


Figura 4.5 Avaliação da densidade (FLOW-3D Documentation, 2016).



Figura 4.6 Gravidade (FLOW 3D Documentation, 2016).

Viscosidade e turbulência presente na Figura 4.7: É neste ponto que definimos o modelo de turbulência utilizado nesta simulação. A justificação da escolha deste modelo já está exposta anteriormente no capítulo 3.

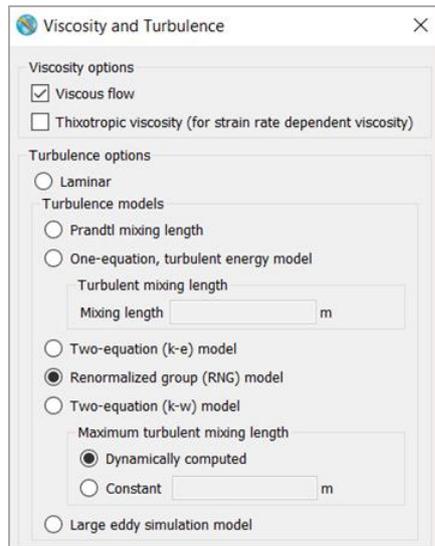


Figura 4.7 Viscosidade e turbulência (FLOW-3D Documentation, 2016).

Modelo de sedimentação: Este modelo assume múltiplos tipos de sedimentos não coesivos com propriedades diferentes, incluindo dimensão dos grãos, densidade das partículas, tensões tangenciais críticas, ângulo de repouso e parâmetros que caracterizam o arrastamento e transporte. Por exemplo, areia média, areia grossa e cascalho fino podem ser categorizados em três tipos diferentes numa simulação.

O modelo estima o movimento do sedimento prevendo a erosão, advecção e deposição de sedimentos. No FLOW-3D isso é feito considerando-se dois modos de transporte sólido: sedimentos em suspensão e sedimento com transporte por arrastamento. Os sedimentos transportados em suspensão são tipicamente de baixa concentração em que as partículas se deslocam no seio do escoamento. O sedimento depositado no leito existe na fração crítica do que pode ser definida pelo usuário (o valor padrão é 0,64) a definição do sedimento apresenta-se na Figura 4.8.

Para a caracterização do sedimento é necessário obter diferentes parâmetros, tais como o diâmetro da areia utilizada a massa volúmica e o Número de *Shields* Crítico. A areia apresenta o valor característico de $D_{50} = 0,00086$ m sendo a sua massa volúmica de $\rho_s = 2660$ kgm⁻³.

A equação de Soulsby-Whitehouse pode ser utilizada para prever o parâmetro Crítico de *Shields*, este parâmetro pode ser definido pelo usuário ou calculado. Por padrão, o parâmetro Crítico de *Shields* é 0,05. O primeiro passo para calcular este parâmetro adimensional $d_{*,i}$ é (FLOW-3D Documentation, 2016):

$$d_{*,i} = d_i \left[\frac{\rho(\rho_s - \rho) \|g\|}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.1)$$

Onde ρ_s é a massa volúmica do material de fundo, ρ é a massa volúmica da água, d_i é o diâmetro, μ a viscosidade dinâmica do fluido e $\|g\|$ é a magnitude da aceleração da gravidade g .

A partir disto, o parâmetro adimensional *Critical Shields* é calculado usando a equação de Soulsby-Whitehouse:

$$\theta_{cr,i} = \frac{0,3}{1+1,2d_{*,i}} + 0,055[1 - \exp(-0,02d_{*,i})] \quad (4.2)$$

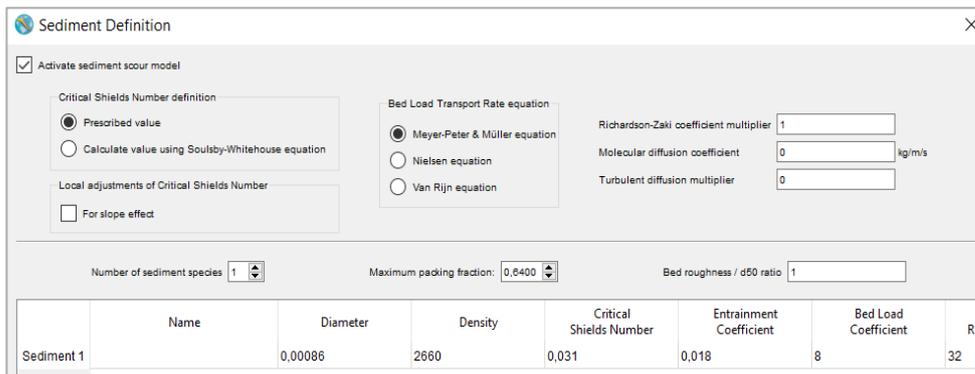


Figura 4.8 Definição do sedimento (FLOW-3D Documentation, 2016).

O próximo ponto dentro do *Model Setup* é definir o fluido sendo que nesta simulação o fluido escolhido foi a água como apresentado na Figura 4.9.

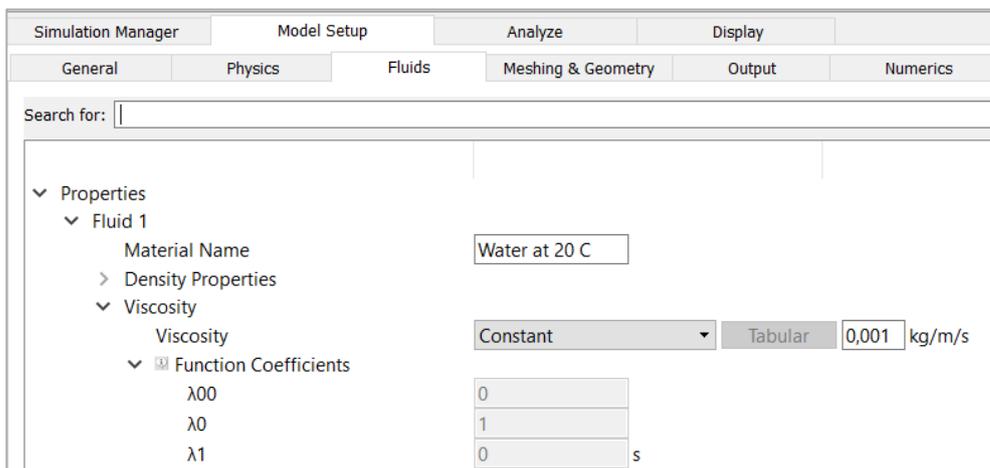


Figura 4.9 Definição do fluido (FLOW-3D Documentation, 2016).

Na opção *Model Setup* o mais importante a ser definido é a parte onde é definida a malha e geometria (*Meshing & Geometry*), neste ponto é onde é feita a maior parte do trabalho gráfico detalhado no arquivo de entrada para cada simulação. Ele é organizado por diferentes subjanelas, cada uma das quais é ajustável ao pretendido. Uma breve descrição deste ícone esta presente na Figura 4.10.

ICON	DESCRIPTION	DISCUSSION/DETAILS
	Open the Geometry window	Geometry
	Open the Meshing window	Meshing
	Open the Boundary Conditions window	Mesh Boundary Conditions
	Open the Initial Conditions window	Initial Conditions
	Open the Particles window	Particle blocks and sources
	Open the Mass-momentum sources window	Mass-momentum sources
	Open the Baffles window	Baffles
	Open the Valves window	Valves
	Open the Springs, Ropes, and Mooring Lines window	Springs, Ropes, and Mooring Lines
	Open the History Probes window	History Probes
	Open the Flux surfaces window	Flux surfaces
	Open the Sampling volumes window	Sampling Volumes

Figura 4.10 Descrição do ponto malha e geometria (FLOW-3D *Documentation*, 2016).

Os ícones utilizados serão a geometria, a malha, as condições de fronteira e as condições iniciais. Começando pela geometria, esta é construída em FLOW-3D através da montagem de objetos geométricos sólidos para definir a região de escoamento para uma simulação como se pode verificar na Figura 4.11. A geometria do escoamento é então incorporada na grade computacional pelo pré-processador usando uma técnica designada por FAVORTM, um acrônimo para Representação de Obstáculos de Área Fracionária / Volume como referido anteriormente no capítulo 3.

Existem três geometrias que precisam ser definidas para cada simulação, consoante esta inclua ou não os detritos. O que é comum a todas elas é o pilar, simulado por um cilindro com 50 mm de diâmetro e a sua base retangular, estes dois componentes formam o canal a simular representado na Figura 4.12; a secção de entrada que é colocada a uma distância de 3,0 m a montante do pilar e a secção de saída que é colocada a 2,5 m a jusante dele. Estas dimensões foram definidas de modo a garantir que, por um lado, o escoamento se encontre desenvolvido antes da seção do pilar e, por outro lado, não se tornar excessivamente pesada a simulação numérica. Para simular os detritos foram criadas duas caixas, uma retangular outra triangular, tal como referido no capítulo 2, encontrando-se representadas nas Figuras 4.13 e 4.14. Nas Figuras 4.13 a) e 4.14 a) apresentam-se os detritos simulados no FLOW-3D e nas Figuras 4.13 b) e 4.14 b) os detritos utilizados por Dias (2018) no trabalho experimental. Os detritos apresentam uma dimensão de 10 cm x 5 cm x 10 cm e foram simulados por cilindros com dimensão de 2,5 cm; 5 cm; 7,5 cm e 10 cm e diâmetros aleatórios entre 0,6 a 1,2 cm.

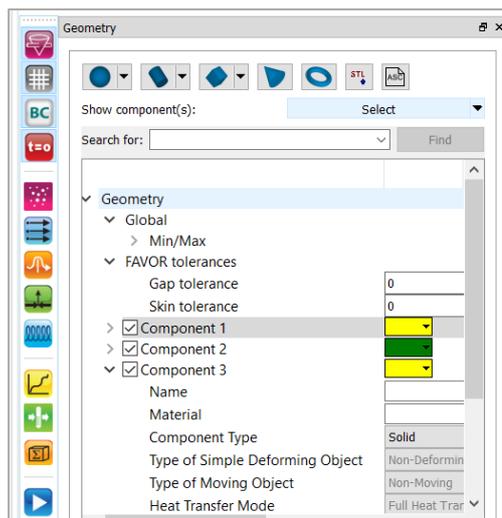


Figura 4.11 Geometria (FLOW-3D Documentation, 2016).

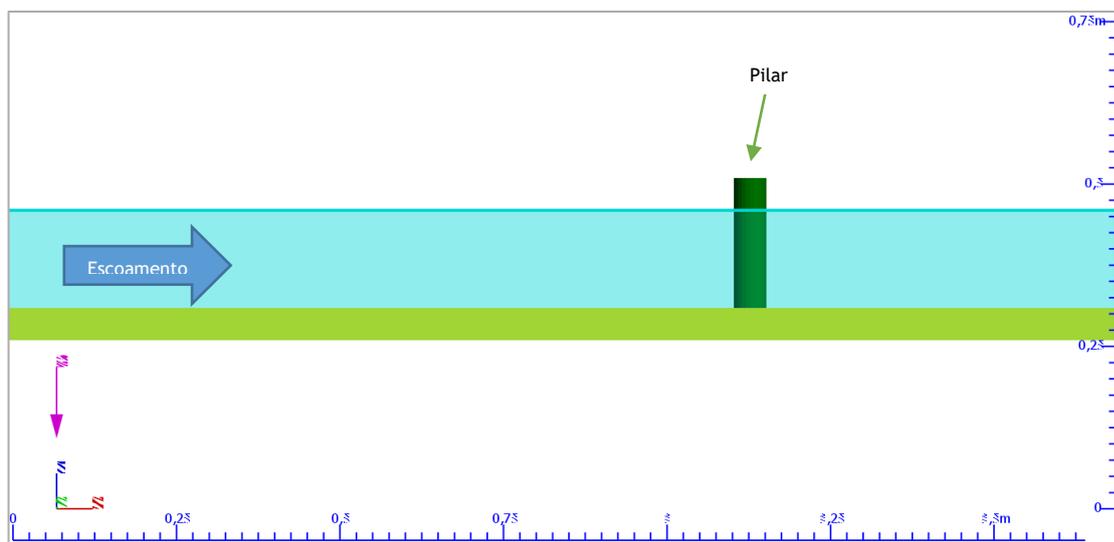


Figura 4.12 Desenho esquemáticos do canal.

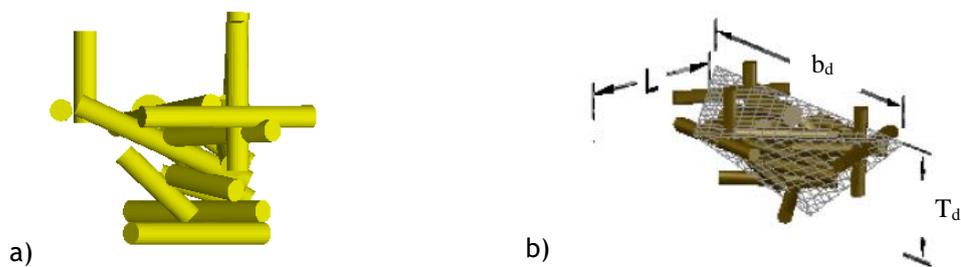


Figura 4.13 Caixa de detritos de forma triangular: a) FLOW-3D; b) Dias (2018).

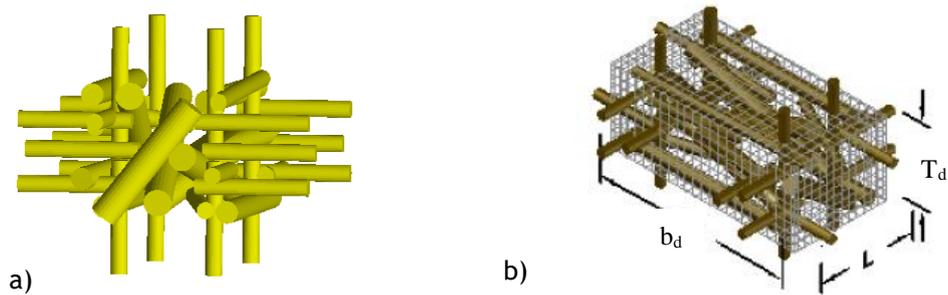


Figura 4.14 Caixa de detritos de forma retangular: a) FLOW-3D; b) Dias (2018).

O FLOW-3D utiliza uma malha estruturada que pode ser definida num sistema de coordenadas cartesianas ou cilíndricas. Como mencionado anteriormente, as geometrias interagem com a malha seguindo o método FAVORTM, onde obstáculos são incorporados na malha, bloqueando parcialmente os volumes das células e as áreas da face. Isso permite definições completamente independentes da malha e da geometria, para que a geometria possa ser modificada sem redefinir a malha. Também é possível definir vários blocos de malha para criar malhas mais eficientes ao modelar domínios de escoamentos complexos. Na presente simulação foram criados vários planos em cada direção das malhas devido à complexidade do campo de escoamento no redor do pilar para a simulação não se tornar tão demorada, realizou-se um refinamento da malha e definiu-se uma malha mais fechada junto ao pilar, pois é nessa área que queremos que os resultados sejam mais precisos, verificando-se uma malha junto ao pilar nas várias direções, x , y e z de 0,02 m como apresentado nas Figuras 4.15 e 4.16.

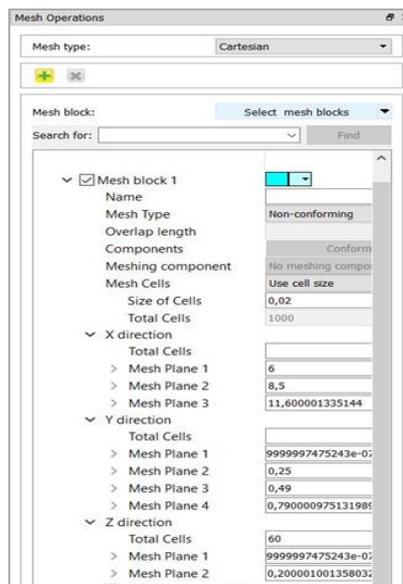


Figura 4.15 Definição da malha (FLOW-3D Documentation, 2016).

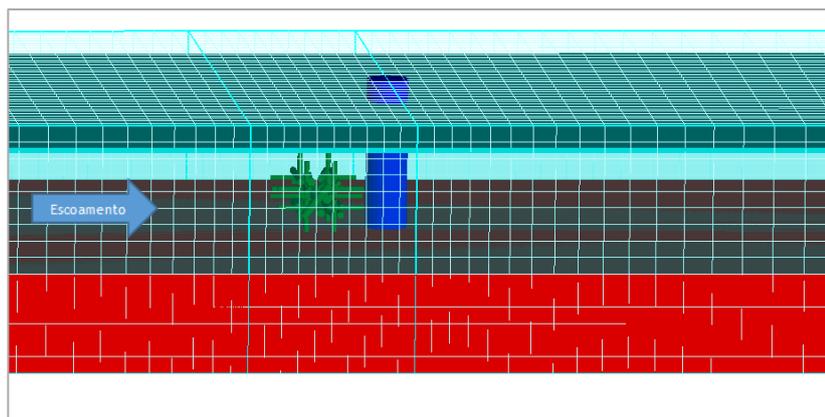


Figura 4.16 Malha (FLOW-3D Documentation, 2016).

As condições de fronteira devem ser definidas manualmente para cada bloco de malha. Existem dois tipos de condições de fronteira no FLOW-3D, de entre as condições de fronteira do tipo *Dirichlet* temos a pressão específica, velocidade específica, taxa de fluxo de volume e parede, onde estas condições exigem que os valores limites sejam definidos, já as condições de fronteira do tipo *Neumann* que são a *Continuative*, *Outflow*, *Symmetry Periodic* e *Grid Overlay* não exigem que os valores limite sejam definidos.

Para realizar a simulação é necessário definir as condições de fronteira adequadas ao tipo de simulação. No presente estudo foram consideradas três condições de fronteira, entre as seis disponíveis, que se encontram resumidas na Tabela 4.1, para as secções limites: *X* mínimo, *X* máximo e *Z* mínimo. É necessário definir uma entrada de água a montante, caracterizada pela velocidade ou pelo caudal, e uma condição de saída a jusante (pressão).

O exemplo de 3 destas alterações estão presentes nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19.

Tabela 4.1 Condições de fronteira

	1ª Simulação	2ª Simulação
X mínimo	Velocidade específica	Taxa de escoamento de volume
X máximo	Pressão específica	Pressão específica
Y mínimo	Simetria	Simetria
Y máximo	Simetria	Simetria
Z mínimo	Parede	Parede
Z máximo	Simetria	Simetria

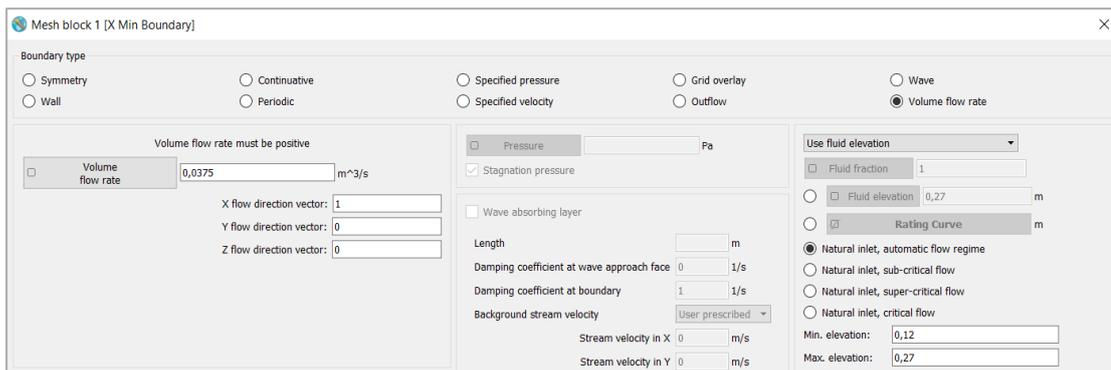


Figura 4.17 X mínimo (FLOW-3D Documentation, 2016).

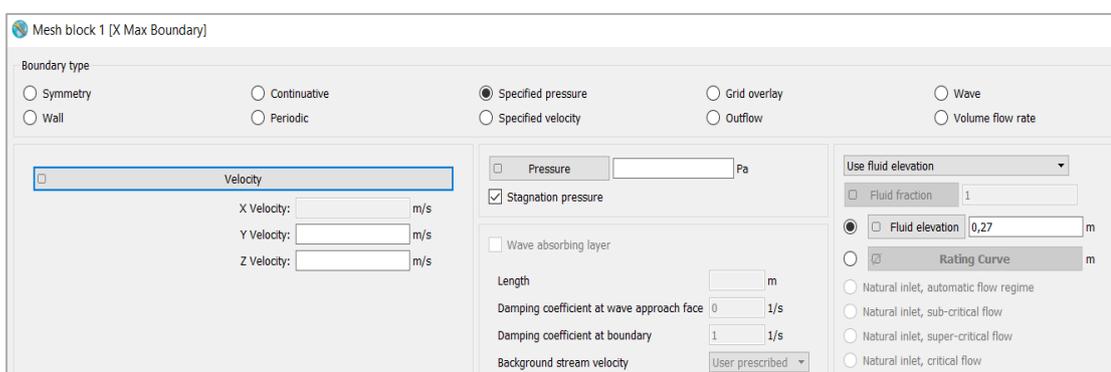


Figura 4.18 X máximo (FLOW-3D Documentation, 2016).

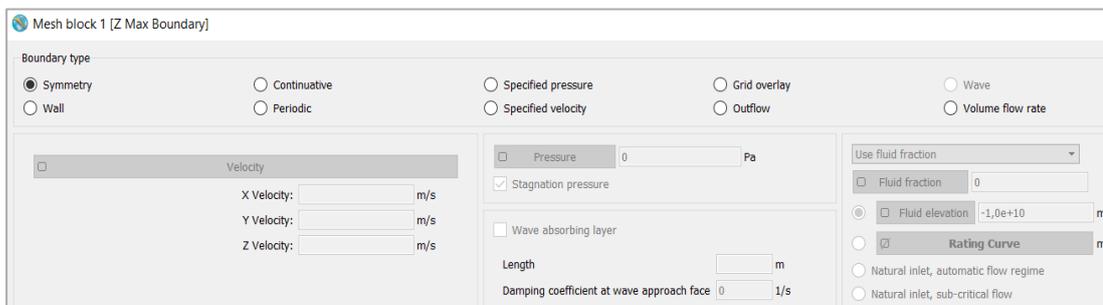


Figura 4.19 Z máximo (FLOW-3D Documentation, 2016).

No passo seguinte, ainda pertencente à malha e geometria definem-se as condições iniciais, estas precisam ser definidas para os objetos sólidos (os componentes) e o fluido dentro do domínio:

- Componentes: A única condição inicial necessária para os objetos sólidos nesta simulação é a velocidade na direção segundo x, esta toma o valor de $0,49 \text{ ms}^{-1}$ na primeira simulação e $0,3165 \text{ ms}^{-1}$ nas seguintes;

- Fluido: As condições iniciais do fluido são um pouco mais complexas. Nesse caso, a configuração do fluido e a velocidade precisam ser definidas. Isto irá inicializar a água em todo o domínio até $Z = 0,11$ m na primeira simulação e $Z = 0,27$ m nas seguintes e atribuir uma velocidade na direção segundo x de $0,49 \text{ ms}^{-1}$ na primeira simulação e $0,3165 \text{ ms}^{-1}$ nas seguintes simulações.

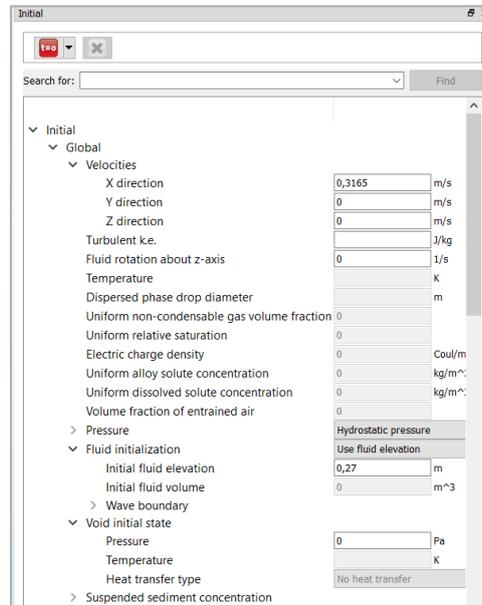


Figura 4.20 Condições iniciais (FLOW-3D Documentation, 2016).

Para concluir o Model Setup falta o ponto Output. Esta seção fornece uma breve descrição dos diferentes tipos de dados no FLOW-3D e como configurá-los. Intervalos de saída dependentes do tempo podem ser especificados para todos os tipos de dados de saída. Define-se o intervalo de dados selecionados como 10 s e, em seguida, marcam-se as caixas como por exemplo, a velocidades do escoamento e a pressão como apresentado na Figura 4.21.

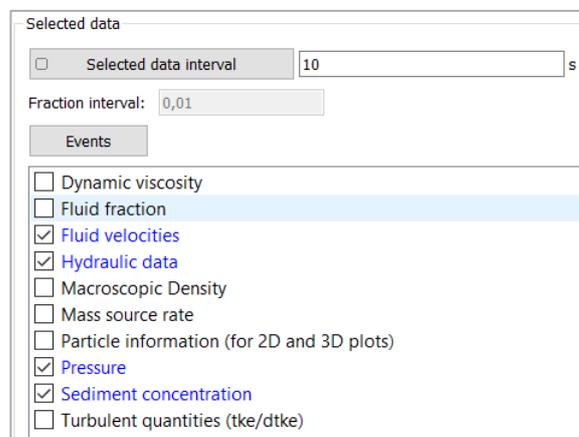


Figura 4.21 Intervalo de dados (FLOW-3D Documentation, 2016).

Para concluir esta simulação falta fazer com que esta seja executada para isso fazemos um pré-processamento de uma simulação, o pré-processamento consiste em calcular as condições iniciais e executar alguns testes de diagnóstico no arquivo de entrada. É útil quando se deseja confirmar se o problema está configurado corretamente ou se precisa de algumas informações de diagnóstico do pré-processador. Não é preciso pré-processar uma simulação antes de executá-la. Por fim executa-se a simulação como representado na Figura 4.22, isto é, executar uma simulação é resolver as equações governativas do problema (modelos físicos, geometria, condições iniciais, condições de fronteira, etc.) definidas no arquivo de entrada. O solucionador será iniciado, imprimirá algumas informações na janela de texto na parte inferior do *Simulation Manager*, atualizará os gráficos e, em seguida, será concluído com êxito.

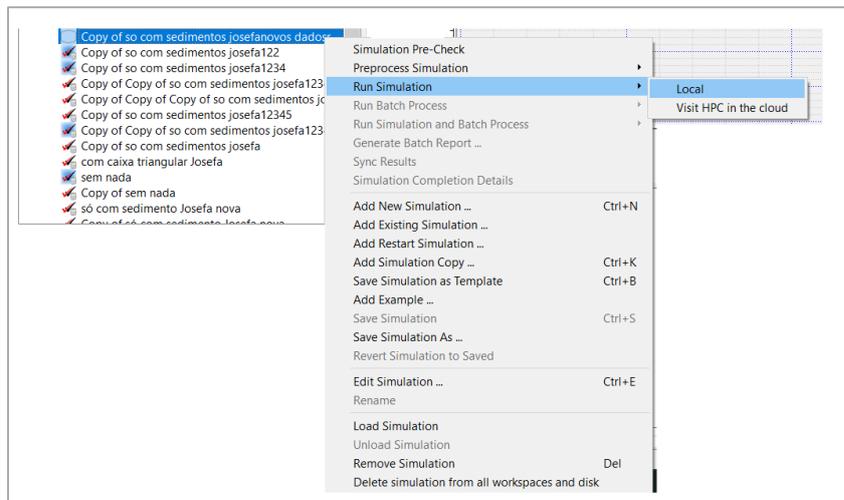


Figura 4.22 Executar simulação (FLOW-3D Documentation, 2016).

CAPÍTULO 5 - Análise e discussão de resultados

5.1 Introdução

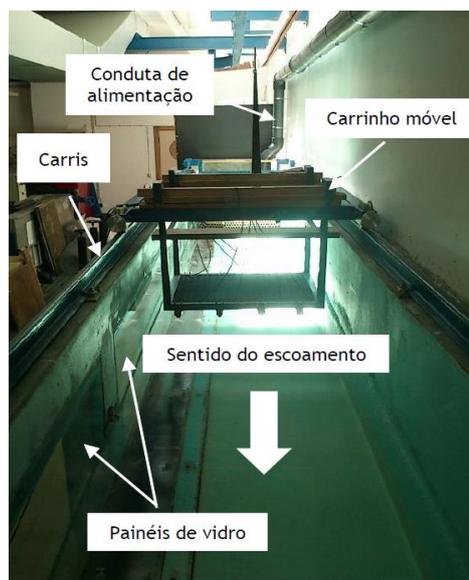
Neste capítulo pretende-se analisar através do FLOW-3D a profundidade máxima das cavidades de erosão que se desenvolvem junto de pilares cilíndricos quando sujeitos a detritos com diferentes formas (triangulares e retangulares) e diferentes submersões (flutuantes à superfície ou depositados no leito). Para além disso, os resultados obtidos no presente estudo serão comparados com os resultados experimentais obtidos por Dias (2018).

O capítulo será estruturado em 4 subcapítulos, no primeiro subcapítulo, como na maioria dos modelos numéricos, será realizada a calibração e validação do modelo computacional por comparação das soluções numéricas obtidas com observações de campo ou resultados experimentais. Assim, e de modo a se proceder à calibração e validação do modelo construído, foi utilizado como base um trabalho experimental realizado na Universidade da Beira Interior, por Robalo, em 2014, no seu trabalho de mestrado, sobre a influência da permeabilidade de elementos cilíndricos verticais no comportamento do escoamento. Analisado e validado o modelo computacional deu-se início às cinco simulações programadas para o estudo, estas constam no segundo subcapítulo, das quais, a primeira foi realizada na presença de um pilar cilíndrico isolado, sem a presença de detritos; a segunda e terceira simulações foram realizadas na presença de detritos de forma triangular depositados no leito ou flutuantes à superfície, respetivamente; a quarta e quinta simulação foram realizadas na presença de detritos de forma retangular depositados no leito ou flutuantes à superfície, respetivamente. De seguida, no terceiro subcapítulo, analisam-se todos os resultados obtidos nas simulações e por fim no quarto subcapítulo a comparação dos resultados obtidos nas simulações numéricas com os resultados experimentais obtidos por Dias (2018).

5.2 Validação do modelo computacional

A construção e calibração do modelo computacional é um dos passos fundamentais da modelação numérica, esta é essencial para validar o modelo e como garantia de que os resultados obtidos são de confiança. Neste âmbito, foi realizada uma primeira simulação tendo em vista a validação do modelo computacional. Para isso foi simulado um escoamento em torno de um pilar cilíndrico implementado em leito fixo. Este primeiro caso teve como objetivo averiguar se o modelo construído numericamente simulava adequadamente os resultados obtidos a nível experimental no trabalho realizado por Robalo (2014), que versava sobre a influência da permeabilidade de elementos cilíndricos verticais no comportamento do escoamento.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 apresenta-se uma imagem do canal onde foi realizado o trabalho experimental e que serviu de base à calibração e uma imagem do pilar, respetivamente, e na Tabela 5.1 os dados das condições experimentais. O canal existente no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas da UBI é de secção retangular, tem 11,60 m de comprimento e 0,79 m de largura, sendo suportado por uma estrutura de betão.



5.1 Vista geral do canal (Robalo, 2014)



5.2 Elemento cilíndrico (Robalo, 2014)

Tabela 5.1 Condições experimentais

Q (m^3/s^{-1})	h (m)	A (m^2)	U_{cs} (ms^{-1})	U (ms^{-1})	Re ($\times 10^4$)	F_r
0,0289	0,0742	0,0586	0,4932	0,0241	3,8663	0,578

O trabalho experimental realizado por Robalo (2014) consistiu na medição das componentes bidimensionais das velocidades instantâneas, vertical e horizontal, com recursos a um sistema 3D de Velocimetria Doppler Laser (LDV), em torno de um elemento cilíndrico impermeável. Este foi colocado no centro de uma secção transversal do canal no qual o escoamento se encontrava completamente desenvolvido e foram definidos três planos perpendiculares à direção do escoamento, desde o fundo do canal até à superfície livre, localizados a montante, no centro e a jusante do elemento cilíndrico como se pode verificar na Figura 5.3.

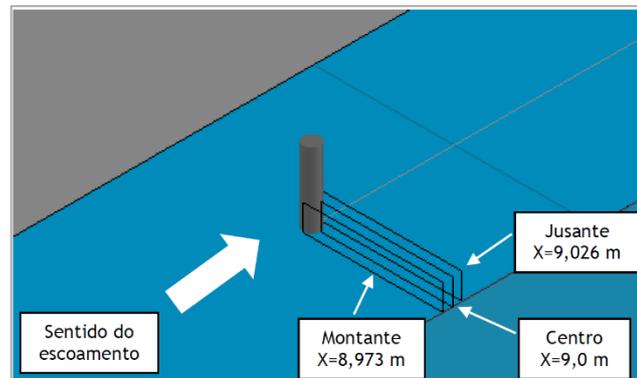


Figura 5.3 Esquema tridimensional com a identificação das secções transversais (Robalo, 2014).

Na presente dissertação foi utilizado o software FLOW-3D para simular o campo de velocidades nas condições consideradas no trabalho realizado pelo Robalo (2014) e foi no programa *FlowSight* pertencente ao FLOW-3D que se analisaram os resultados obtidos. Na Figura 5.4 é possível visualizar o campo de velocidade segundo a direção longitudinal do escoamento obtido na simulação. É importante referir que a figura apresentada pressupõe um escoamento da esquerda para a direita.

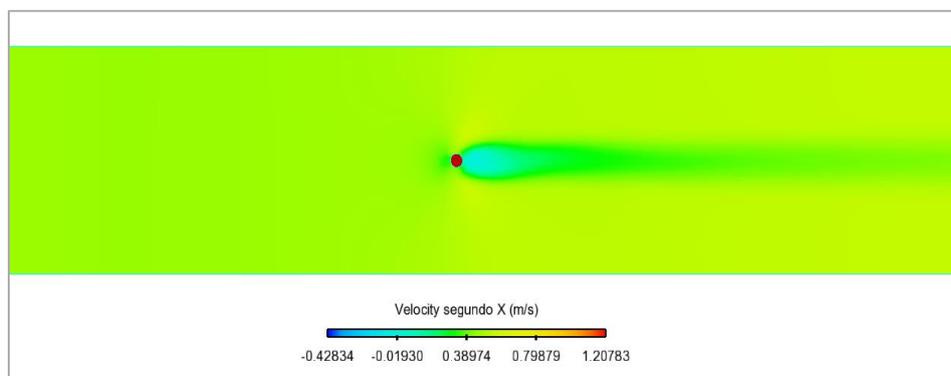


Figura 5.4 Campo de velocidades médias.

Da análise da Figura 5.4 é possível constatar que o campo de velocidades se modifica devido à presença do pilar, verificando-se que a velocidade média do escoamento diminui, à medida que este se aproxima da face a montante do pilar, como se pode verificar com um tom azulado, anulando-se junto à sua face de montante, tal como referido por Carneiro (2015) no seu trabalho que consta num estudo numérico do comportamento do escoamento em torno de um pilar assim como um estudo numérico do transporte de sedimento, utilizando o software de modelação numérica *Delft*, este também verifica que é na zona a montante do pilar que se observa uma diminuição da velocidade.

Seguidamente foi realizada uma análise comparativa entre os valores da velocidade média na direção longitudinal do escoamento como se pode verificar na Figura 5.5, na secção transversal a montante do pilar ($X = 9,0$ m e $Y = 0,373$ m) sendo Z a altura do escoamento, obtidos por Robalo (2014) e os obtidos no presente estudo, o que deu origem à Tabela 5.2 e à Figura 5.7 para melhor percepção dos resultados, na Figura 5.6 apresenta-se os resultados obtidos com uma malha menos refinada para servir de objeto de comparação com a Figura 5.7. A tabela inclui ainda os desvios percentuais, δ , entre as velocidades. É de notar que as profundidades do escoamento foram consideradas de forma adimensional.

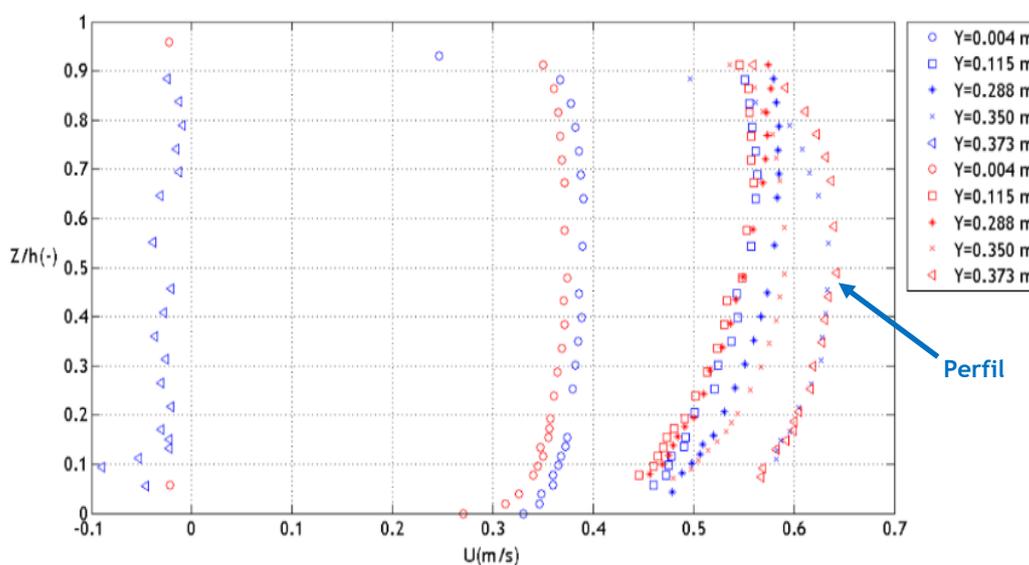


Figura 5.5 Distribuição vertical da velocidade média do escoamento, secção de centro (Robalo, 2014).

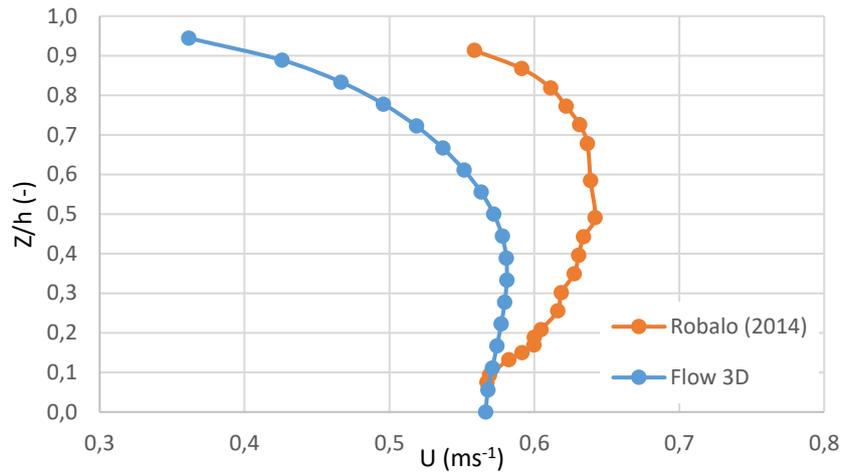


Figura 5.6 Comparação entre o perfil vertical da velocidade média do escoamento com malha diferente.

Tabela 5.2 Comparação das velocidades obtidas na análise experimental e na análise numérica.

Z/h (-)	U (ms^{-1}) Robalo (2014)	U (ms^{-1}) FLOW-3D	δ (%)
0,075	0,567	0,542	4,48
0,094	0,569	0,572	0,61
0,132	0,582	0,589	1,12
0,150	0,591	0,601	1,63
0,170	0,600	0,611	1,92
0,189	0,600	0,619	3,24
0,208	0,605	0,627	3,46
0,256	0,616	0,630	2,20
0,301	0,619	0,632	2,10
0,349	0,628	0,631	0,59
0,396	0,631	0,628	0,33
0,442	0,634	0,624	1,66
0,491	0,642	0,616	3,97
0,585	0,639	0,607	4,98
0,678	0,637	0,602	5,47
0,726	0,631	0,592	6,27
0,772	0,622	0,582	6,50
0,819	0,611	0,563	7,85
0,868	0,591	0,552	6,71
0,913	0,559	0,524	6,28

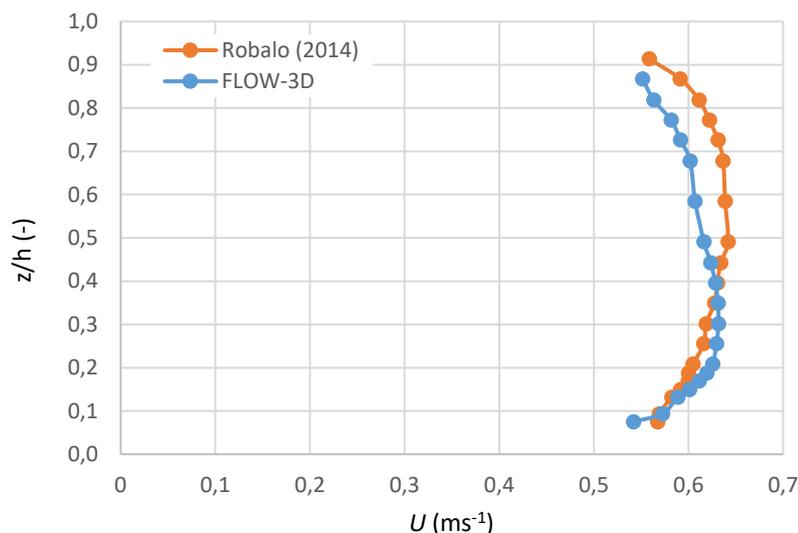


Figura 5.7 Comparação entre o perfil vertical da velocidade média do escoamento.

Da análise da Tabela 5.2 e da Figura 5.7 é possível constatar que o perfil de velocidades obtido através da simulação numérica expõe o mesmo andamento do perfil de velocidades obtido experimentalmente. Os perfis apresentam-se praticamente coincidente para valores de z/h inferiores a 0,4. Acima dos $z/h = 0,4$ os valores obtidos numericamente são inferiores aos obtidos experimentalmente, ainda assim apresentam uma média dos desvios percentuais de 3,35 % e um desvio padrão de 2,3 %, podendo concluir-se que o modelo numérico apresenta rigor adequado. Da análise da Figura 5.6 em comparação com a Figura 5.7 pode-se concluir que ao utilizar uma malha mais refinada obtemos melhores resultados, apesar do andamento do perfil ser o mesmo os resultados são mais díspares, apresentando uma média de desvios percentuais de 7,7 % e um desvio padrão de 11,3 %.

Pressupõem-se que a condição de se apresentarem velocidades inferiores na simulação numérica se pode dever à circunstância da utilização do modelo $k-\varepsilon$ RNG para efetuar as simulações ou devido ao facto de se ter simulado o canal com um comprimento mais reduzido para que a simulação decorra-se em menos tempo, aspeto já salientado por Carneiro (2015).

5.3 Simulações numéricas

5.3.1 Simulação 1 - Pilar isolado

Verificada a qualidade do modelo construído inicialmente, esta primeira simulação, realizada na presença de um pilar cilíndrico isolado inserido sobre um fundo móvel, servirá como ensaio de referência de modo a analisar a influência da forma e posição dos detritos na morfologia das cavidades de erosão. Nesta simulação, bem como nas restantes, o pilar utilizado foi um pilar cilíndrico com um diâmetro de 0,05 m, inserido num canal com 5,50 m de comprimento e 0,83

m de largura. O escoamento é caracterizado por ter uma velocidade média de $0,317 \text{ ms}^{-1}$ e uma altura da água de $0,15 \text{ m}$. O fundo móvel é constituído por uma areia uniforme com diâmetro de $0,86 \text{ mm}$ e com uma massa volúmica de 2660 kgm^{-3} .

Na presente dissertação é utilizado o método dos volumes finitos e o modelo de turbulência $k-\epsilon$ RNG. Para a realização das simulações seguiu-se o procedimento descrito no Capítulo 4 - Procedimento numérico. Para além das variáveis adotadas e que foram descritas nesse capítulo, realça-se a duração das simulações. Estas decorreram durante 4 horas ou seja 14400 segundo, adotando um critério já utilizado por outros autores, nomeadamente, Mohamed (2012). Relativamente às condições de fronteira, correspondentes à secção de montante e jusante do canal, respetivamente, foi considerado a montante uma condição de entrada de água com um caudal de $Q = 37,5 \text{ ls}^{-1}$, ao qual corresponde a velocidade média do escoamento referido anteriormente e a condição a jusante de saída de caudal. Para além disso, foi utilizado o método VOF para assegurar a definição da superfície livre.

Decorridas as 4 horas de simulação passou-se à análise dos resultados obtidos ao nível da morfologia da cavidade de erosão e a sua profundidade máxima bem como ao nível da velocidade média do escoamento. O desenvolvimento da cavidade de erosão ao fim das 4 horas de simulação está representada na Figura 5.8 a) onde podemos verificar que imediatamente antes do pilar apresenta um tom azul, que em termos de escala se encontra ente os valores de $0,031 \text{ m}$ até $0,045 \text{ m}$, como se demonstra também no seu respetivo perfil longitudinal na secção de centro do canal apresentado na Figura 5.8 b). Na Figura 5.9 esta representado o campo de velocidades. Qualitativamente, o modelo reproduz corretamente o comportamento esperado, a erosão desenvolve-se a montante como se pode verificar nas Figuras 5.8 a) e b).

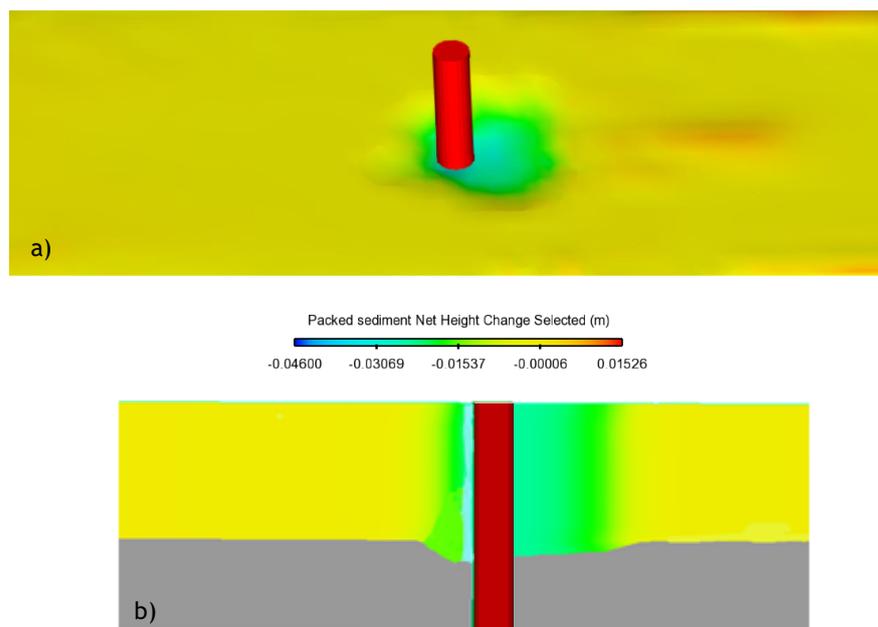


Figura 5.8 Resultados - Pilar isolado: a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal.

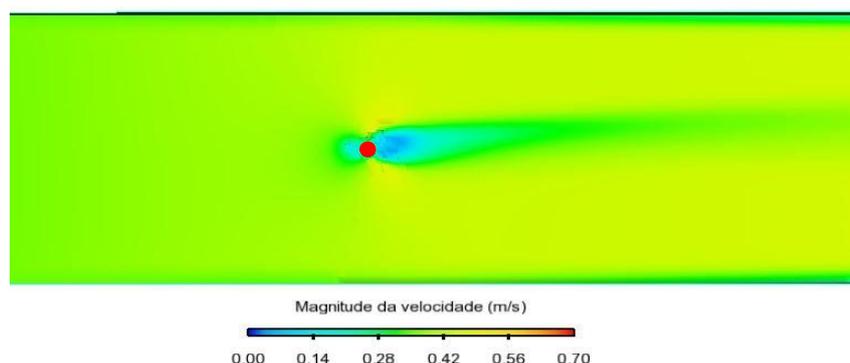


Figura 5.9 Resultados - Pilar isolado: Campo de velocidades médias.

5.3.2 Simulação 2 - Detritos de forma triangular, flutuante

Nesta segunda simulação pretende-se verificar as alterações que decorrem a forma da cavidade de erosão bem como na sua profundidade máxima resultante da introdução de uma caixa de detritos de forma triangular colocada na superfície da água, ou seja, representativa de detritos flutuantes.

Na Figura 5.10 a) esta representado o desenvolvimento da cavidade de erosão ao fim das 4 horas de simulação, da análise da figura pode-se verificar que esta apresenta um tom azul esverdeado imediatamente a montante do pilar, onde se apresenta o valor máximo da cavidade de erosão, em termos de escala encontra-se na zona entre 0,031 m até 0,045 m, como se demonstra também no seu respetivo perfil longitudinal na secção de centro do canal apresentado na Figura 5.10 b).

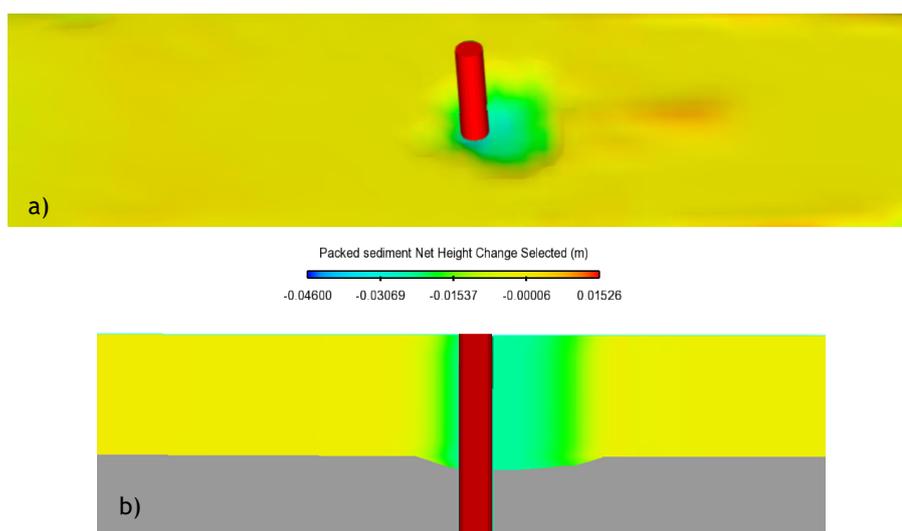


Figura 5.10 Resultados - Caixa triangular flutuante: a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal

Comparando, em termos de profundidade máxima de cavidade de erosão os resultados obtidos na simulação anterior (Pilar isolado), para com a simulação com a introdução de detritos de forma triangular na superfície uma média de desvios percentuais $\approx 2\%$.

Na Figura 5.11 é possível verificar o campo de velocidades.

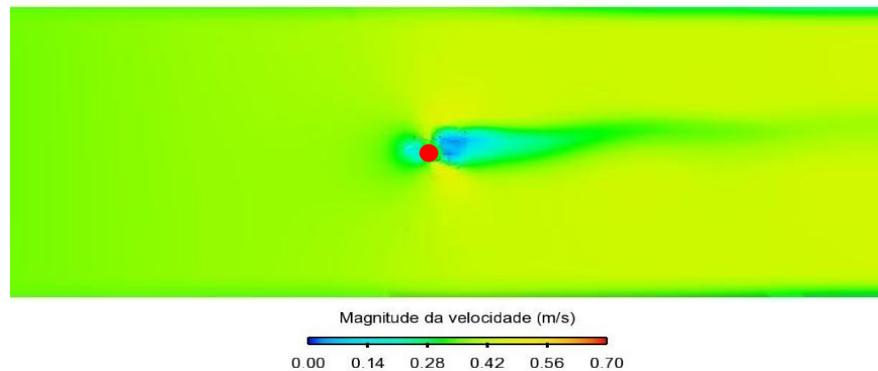


Figura 5.11 Resultados - Caixa triangular flutuante: Campo de velocidades médias.

5.3.3 Simulação 3 - Detritos de forma triangular, depositados no leito

Nesta terceira simulação o objetivo é verificar as alterações que resultam do comportamento dos sedimentos com a introdução de uma caixa de forma triangular, mas diferente da segunda simulação, esta apresenta os detritos depositados no leito de sedimentos.

Na Figura 5.12 a) apresenta-se o desenvolvimento da cavidade de erosão ao fim das 4 horas de simulação, da análise da figura pode-se verificar que esta apresenta um tom azul esverdeado imediatamente a montante do pilar, será nesse local que se verifica o valor máximo de cavidade de erosão, em termos de escala apresentam-se entre os valores de 0,015 m e 0,028 m como se pode observar também na Figura 5.12 b) no seu perfil longitudinal. A introdução da caixa de forma triangular junto ao leito atuou como medida de proteção apresentando valores bastante inferiores aos verificados na primeira simulação (Pilar isolado) obteve-se entre estas simulações, em termos de profundidade máxima de cavidade de erosão, uma média de desvios percentuais bastante elevada relativamente à profundidade máxima de cavidade de erosão de $\approx 40\%$. Tal como nas anteriores simulações o modelo retracts corretamente o comportamento esperado em termos de cavidade de erosão.

Na Figura 5.13 é possível observar o campo de velocidades.

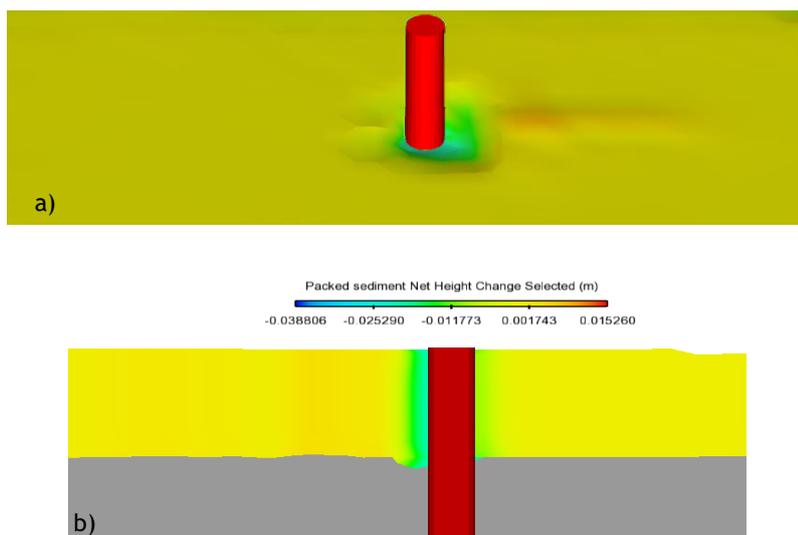


Figura 5.12 Resultados - Caixa triangular no fundo: a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal.

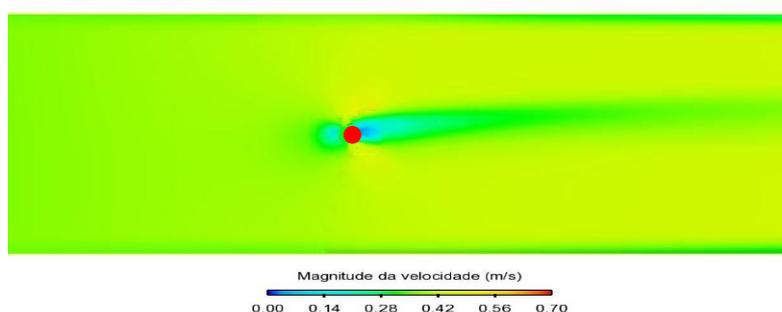


Figura 5.13 Resultados - Caixa triangular no fundo: Campo de velocidades médias.

5.3.4 Simulação 4 - Detritos de forma retangular, flutuante

A quarta simulação tem como objetivo verificar as alterações que resultam do comportamento dos sedimentos com a introdução de uma caixa de forma retangular com detritos na superfície da água ou detritos flutuantes, colocada imediatamente a montante do pilar.

Decorridas as 4 horas de simulação passou-se à análise dos resultados obtidos ao nível da morfologia da cavidade de erosão e a sua profundidade máxima o seu desenvolvimento está representada na Figura 5.14 a) onde podemos verificar que imediatamente antes do pilar apresenta um tom azul forte, sendo que na escala de valores da profundidade de cavidade de erosão apresentam-se entre 0,030 m e 0,060 m, como se demonstra também no seu respetivo perfil longitudinal na secção de centro do canal apresentado na Figura 5.14 b).

Comparando, em termos de profundidade máxima de cavidade de erosão os resultados obtidos na simulação onde apenas se introduziu o pilar isolado, para com a simulação com a presença

de uma caixa de detritos de forma retangular flutuante uma média de desvios percentuais de $\approx 12\%$. Na Figura 5.15 é possível verificar o campo de velocidades.

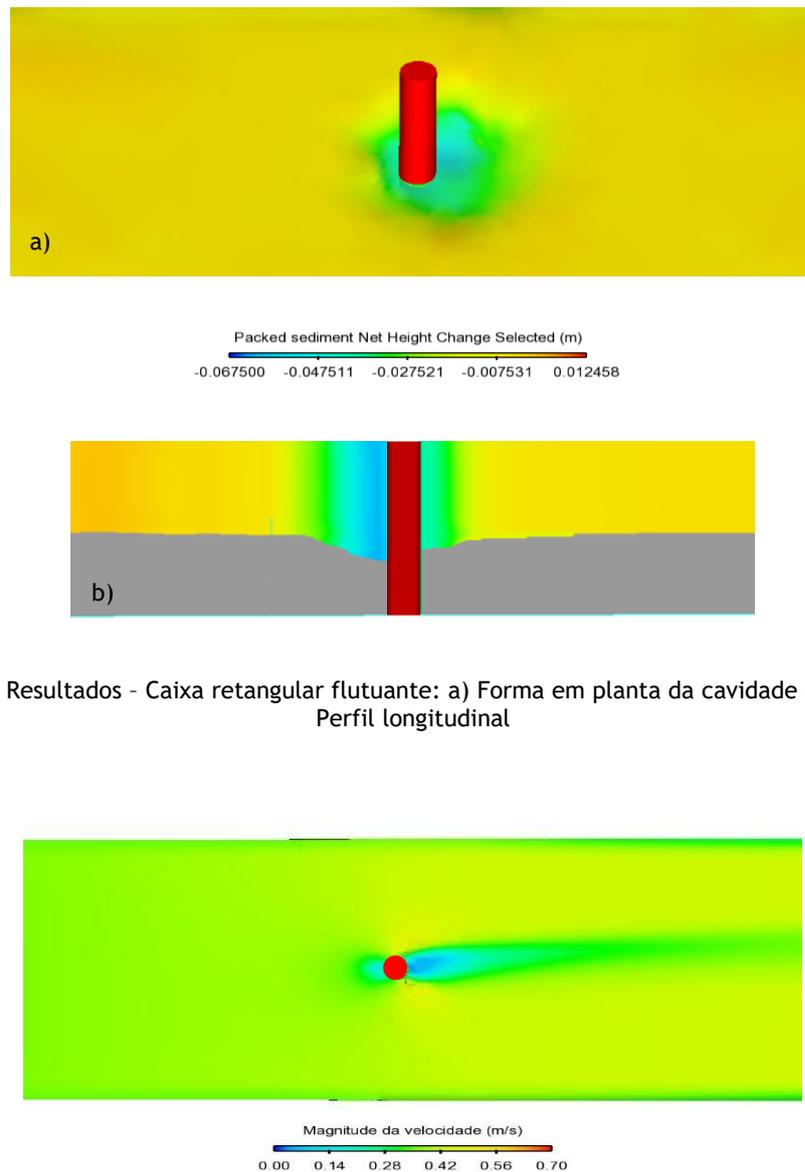


Figura 5.14 Resultados - Caixa retangular flutuante: a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal

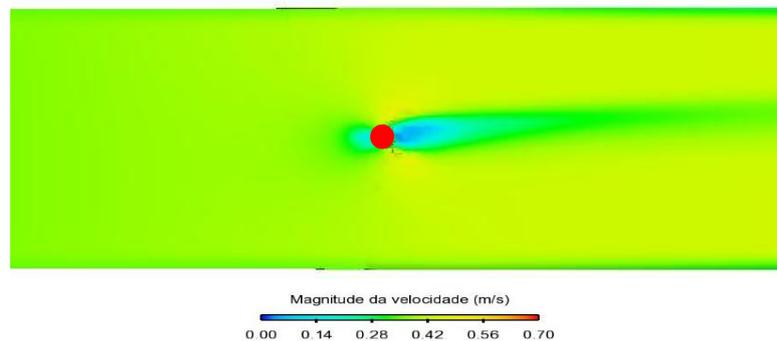


Figura 5.15 Resultados - Caixa retangular flutuante: Campo de velocidades médias.

5.3.5 Simulação 5 - Detritos de forma retangular, depositados no fundo

A quinta e última simulação tal como as restantes o seu propósito é verificar as alterações que resultam do comportamento dos sedimentos com a introdução de uma caixa de forma retangular com detritos no fundo junto ao leito de sedimentos, colocada imediatamente a montante do pilar.

Na Figura 5.16 a) esta representado o desenvolvimento da cavidade de erosão ao fim das 4 horas de simulação, da análise da figura pode-se verificar que esta apresenta um tom azul esverdeado imediatamente a montante do pilar, onde se apresenta o valor máximo da cavidade

de erosão, analisando a escala estes valores encontram-se entre 0,030 m e 0,060 m, como se demonstra também no seu respetivo perfil longitudinal na secção de centro do canal apresentado na Figura 5.16 b).

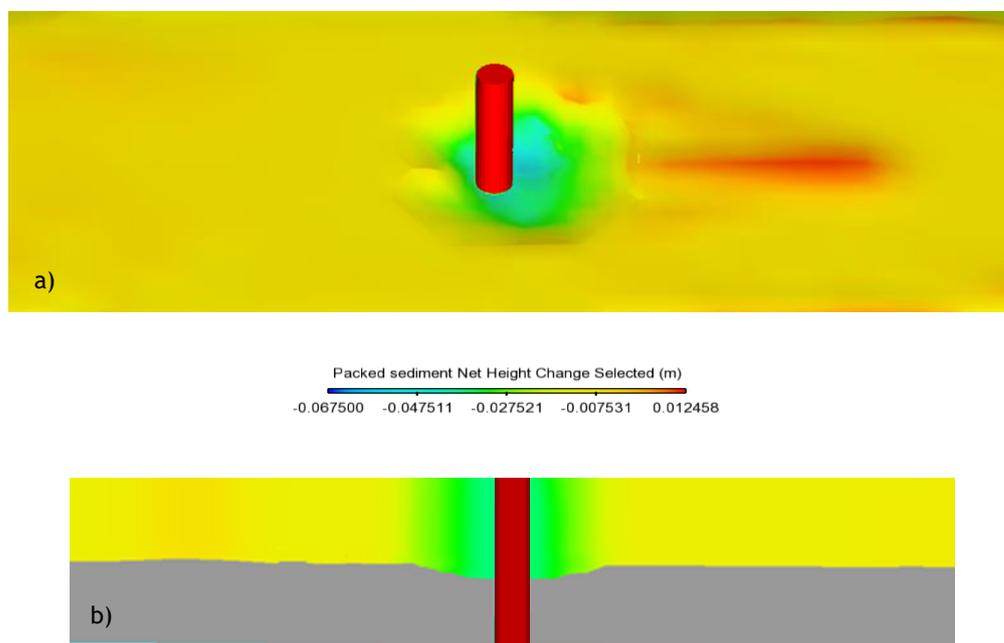


Figura 5.16 Resultados - Caixa retangular no fundo: a) Forma em planta da cavidade de erosão; b) Perfil longitudinal.

Tal como nas anteriores simulações o modelo retracts corretamente o comportamento esperado, comparando em termos de profundidade máxima de cavidade de erosão, a simulação com a introdução de uma caixa de detritos de forma retangular depositados no leito com a primeira simulação em que apenas se utilizou o pilar isolado obteve-se uma média de desvios percentuais de $\approx 10\%$.

Na Figura 5.17 é possível verificar o campo de velocidades.

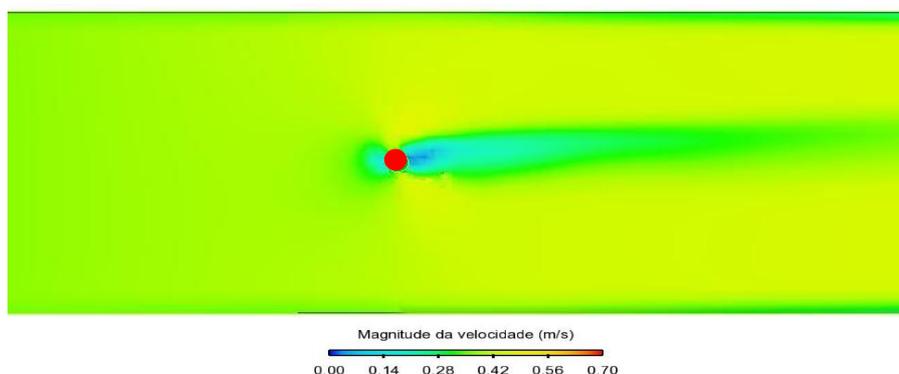


Figura 5.17 Resultados - Caixa retangular no fundo: Campo de velocidades médias.

Em jeito de conclusão, no que concerne às velocidades médias e analisando as 5 simulações pode-se constatar-se que esta se altera com a presença do pilar, verificando-se que a velocidade média do escoamento diminui, à medida que este se aproxima da face a montante do pilar, como se pode verificar com um tom azulado, tal como referido por Carneiro (2015).

As configurações obtidas nas cavidades de erosão devido à presença da caixa de detritos de forma triangular e retangular, seja na superfície ou no fundo, pode-se constatar que não existe o aparecimento de segundas cavidades em nenhum dos ensaios, contrariando o proposto por Lagasse *et al.* (2010) presente na Figura 2.11 a) e b).

5.4 Evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão

Os resultados de cada simulação foram apresentados anteriormente nos subcapítulos expostos, a realização das simulações tiveram um período de 4 horas, sendo a primeira simulação sem a presença de detritos, a segunda com a utilização de detritos de forma triangular flutuantes e uma terceira simulação com esses mesmo detritos de forma triangular junto ao leito, uma quarta simulação com a presença de detritos de forma retangular flutuantes e uma quinta simulação com esses mesmo detritos junto ao leito.

Nesta ligação apresenta-se seguidamente a análise dos resultados obtidos a partir das simulações descritas. Na Figura 5.18 apresenta-se a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão que se verifica nas cinco simulações apresentadas.

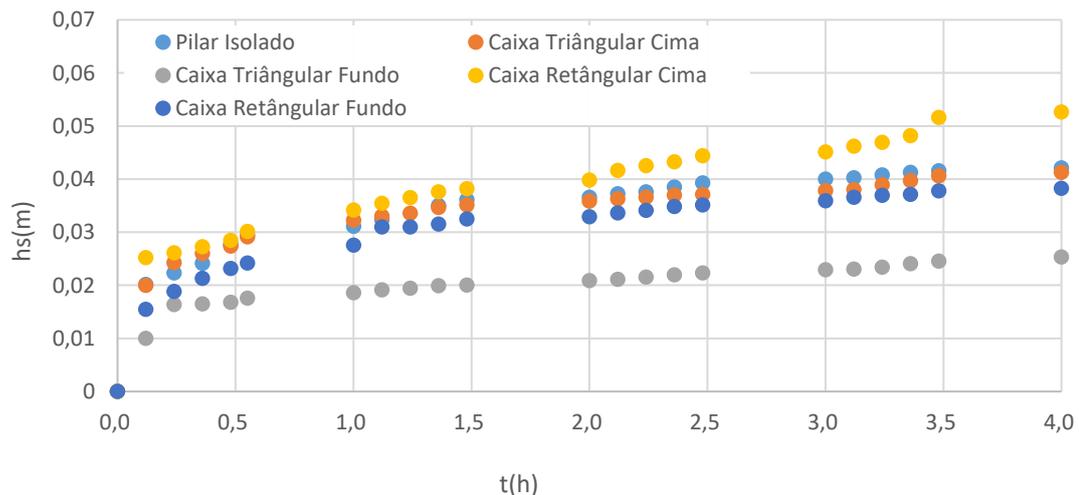


Figura 5.18 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão nas diferentes simulações (t = 4 horas).

Podemos então concluir pela análise da Figura 5.18 que a profundidade máxima da cavidade de erosão ao longo do tempo compreende valores maioritariamente superiores na utilização de detritos de forma retangular na superfície da água ou seja detritos flutuantes. Podemos também observar que a caixa retangular na superfície apresenta valores superiores à caixa triangular na superfície. Relativamente à caixa triangular no fundo podemos observar que esta apresenta valores muito inferiores às restantes simulações podendo até ser considerada como uma medida de proteção contra as erosões localizadas.

Os resultados obtidos através do FLOW-3D e utilizando a simulação apenas com o pilar isolado como termo de comparação permitiram constatar que os detritos simulados com a caixa retangular flutuante origina maior profundidade máxima da cavidade de erosão, uma média de $\approx 12\%$ e que os detritos simulados com a caixa triangular no fundo foi a que apresentou menor profundidade máxima da cavidade de erosão, apresentando uma média de $\approx 40\%$.

- Comparação dos resultados com Dias (2018)

Foi utilizado como objeto de comparação um trabalho realizado por Dias, em 2018, neste trabalho de carácter essencialmente experimental, propõe-se estudar o efeito das características geométricas dos detritos na profundidade máxima das cavidades de erosão, realizado no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas da Universidade da Beira Interior. Na Figura 5.19 apresenta-se a imagem final representativa da cavidade de erosão para a simulação apenas com o pilar isolado.

Seguidamente, na Figura 5.20 é possível verificar a comparação de resultados feita por meio de um gráfico. Os resultados analisados correspondem às primeiras 4 horas de simulação numérica e de ensaio experimental. Analisando os resultados obtidos na simulação numérica, previu-se que a profundidade máxima da cavidade de erosão, sem a presença de detritos, toma o valor de 0,042 m. Desta forma, pode-se constatar também que os resultados numéricos comparativamente aos resultados experimentais apresentam um andamento similar, no entanto, são consideravelmente menores, $\approx 30\%$.

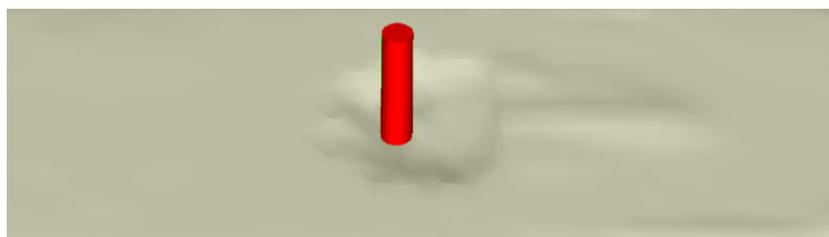


Figura 5.19 Resultados - Pilar isolado: Imagem final da cavidade de erosão.

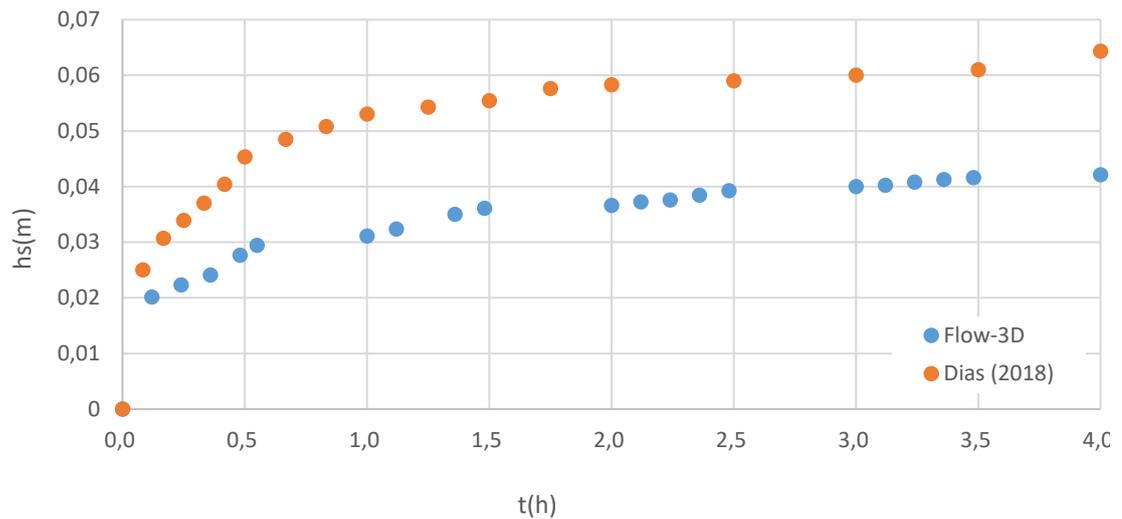


Figura 5.20 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Pilar isolado

Na Figura 5.21, é apresentada a imagem final representativa da cavidade de erosão com a introdução de uma caixa de detritos de forma triangular flutuantes. Na Figura 5.22 estão expostos os resultados obtidos, no que diz respeito à simulação realizada na presença de detritos de forma triangular flutuantes, e comparados com Dias (2018). Da análise da simulação numérica resultou uma profundidade máxima da cavidade de erosão de valor 0,0412 m. Tal como na anterior simulação é possível verificar que os resultados apresentam um andamento similar aos obtidos experimentalmente, no entanto, são consideravelmente menores, $\approx 30\%$.

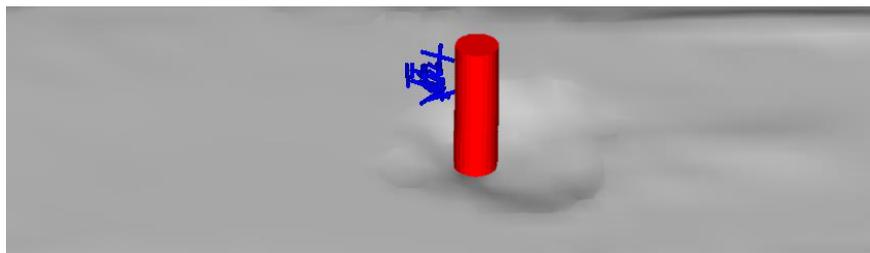


Figura 5.21 Resultados - Caixa triangular flutuante: Imagem final da cavidade de erosão.

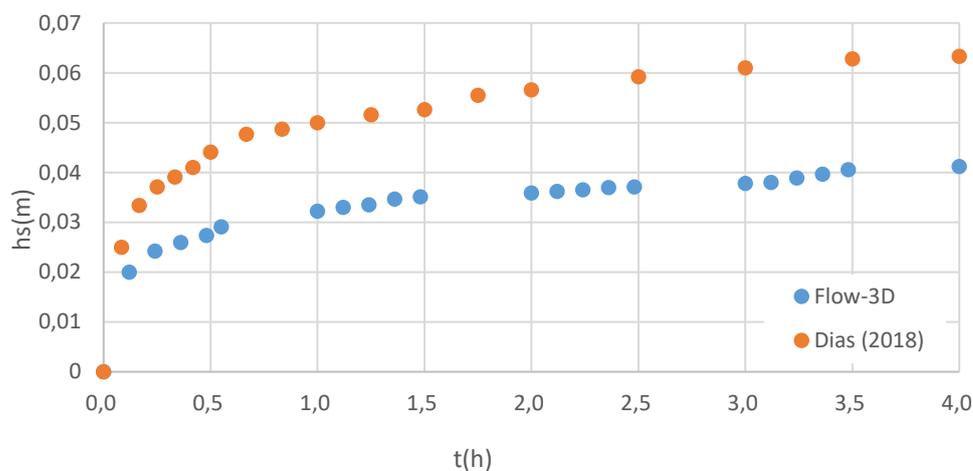


Figura 5.22 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Caixa triangular superfície.

Na Figura 5.23 esta exibida a imagem final representativa da cavidade de erosão com a presença de detritos de forma triangular depositados no leito. Na Figura 5.24 pode-se verificar os resultados obtidos através da simulação numérica e comparados com Dias (2018). Da análise da simulação numérica resultou a profundidade máxima da cavidade de erosão de valor 0,0253 m. Tal como nas simulações anteriormente explicitas é possível verificar que os resultados apresentam um andamento similar aos obtidos experimentalmente, no entanto, são consideravelmente menores, $\approx 20\%$.

No caso dos detritos de forma triangular depositados no leito revelaram-se como uma medida de proteção contra as cavidades de erosão, como Dias (2018) também conclui em seu estudo.

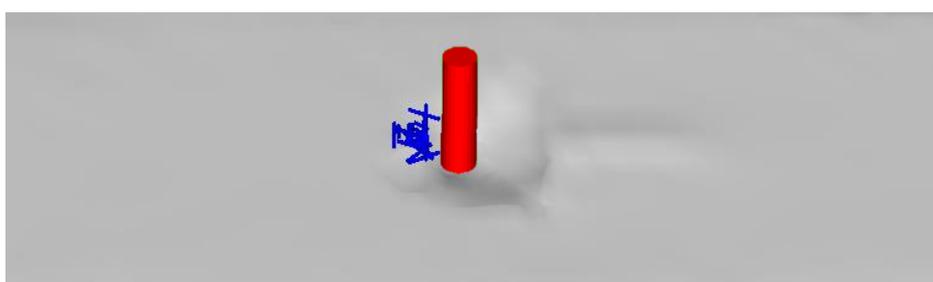


Figura 5.23 Resultados - Caixa triangular no fundo: Imagem final da cavidade de erosão.

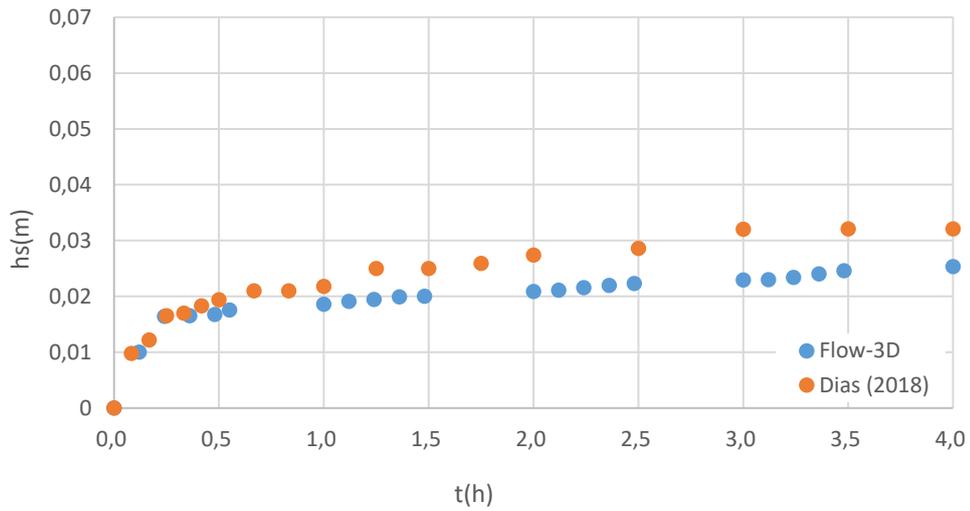


Figura 5.24 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Caixa triangular no fundo.

Na Figura 5.25 é apresentada a imagem final representativa da cavidade de erosão com a presença de detritos de forma retangular flutuantes. Na Figura 5.26 estão expostos os resultados obtidos, no que diz respeito à simulação realizada na presença de detritos de forma triangular flutuantes, e comparados com Dias (2018). Da análise da simulação numérica resultou uma profundidade máxima da cavidade de erosão de valor 0,0526 m. Tal como nas simulações expostas anteriormente é possível verificar que os resultados apresentam um andamento similar aos obtidos experimentalmente, no entanto, são consideravelmente menores, $\approx 30\%$.

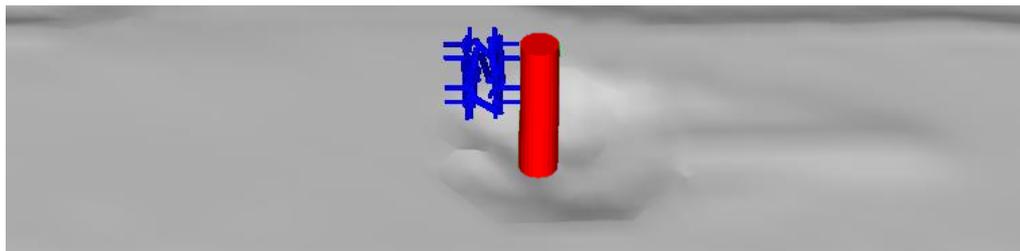


Figura 5.25 Resultados - Caixa retangular na superfície: Imagem final da cavidade de erosão.

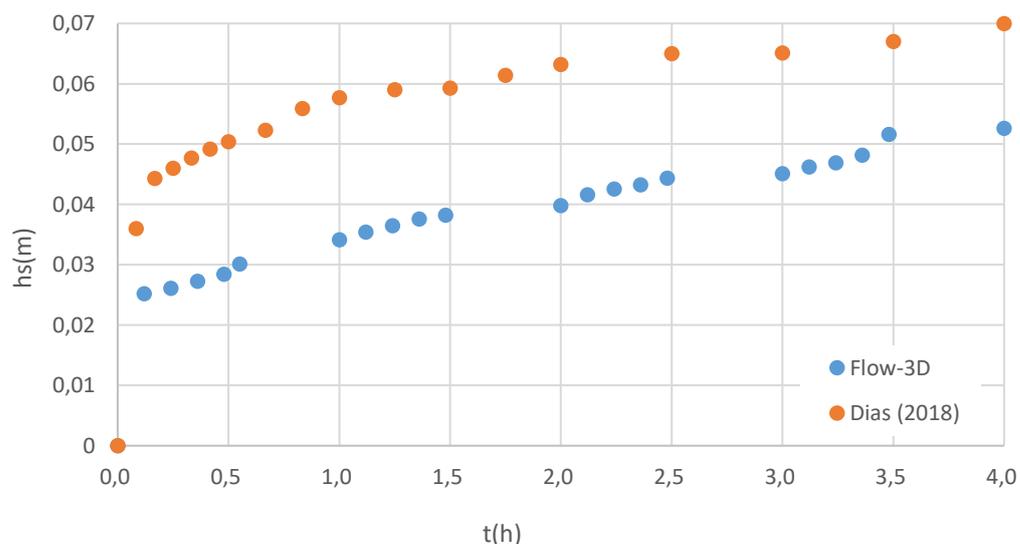


Figura 5.26 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Caixa retangular na superfície.

Por fim na Figura 5.27 encontra-se a imagem final representativa da cavidade de erosão com a presença de detritos de forma retangular no fundo. Na Figura 5.28 pode-se verificar os resultados obtidos através da simulação numérica e comparados com Dias (2018). Da análise da simulação numérica resultou a profundidade máxima da cavidade de erosão de valor 0,0383 m. Tal como nas simulações anteriormente explicitas é possível verificar que os resultados apresentam um andamento similar aos obtidos experimentalmente, no entanto, são consideravelmente menores, $\approx 20\%$.

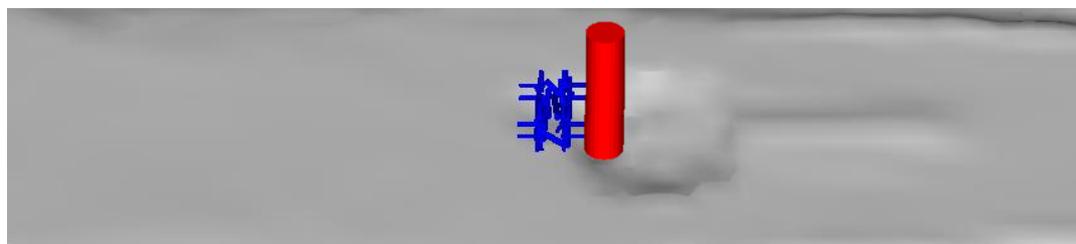


Figura 5.27 Resultados - Caixa retangular no fundo: Imagem final da cavidade de erosão.

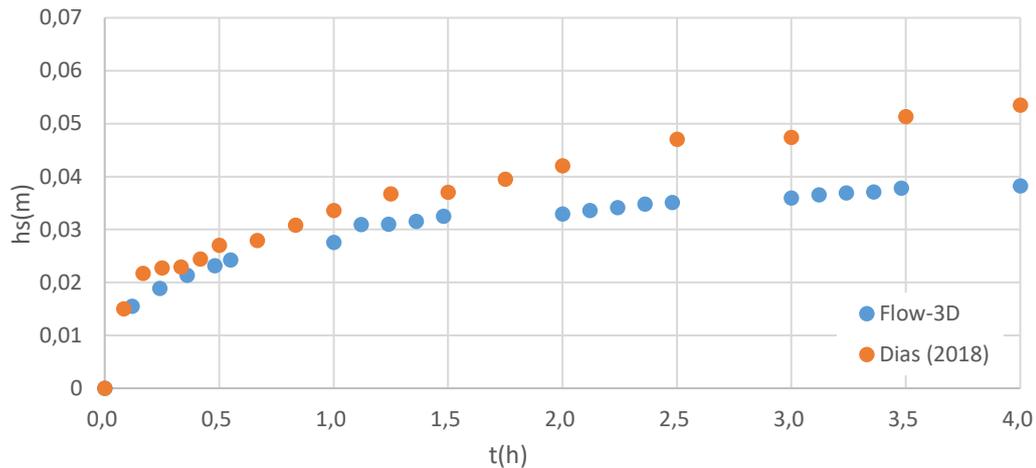


Figura 5.28 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Caixa retangular no fundo.

Pode-se então concluir com a análise das simulações e comparativamente com Dias (2018) que os valores obtidos da profundidade máxima de cavidade de erosão numericamente não servem de termo de comparação com os resultados experimentais.

Li et al. (2013) no seu estudo acerca de uma simulação numérica 3D de escoamento e erosão local em torno de um dique refere que devido à complexidade do escoamento turbulento e ao movimento do sedimento em torno do dique de escoamento, a profundidade de erosão não serve de comparação com o valor experimental. Wei et al. (2014) no seu estudo afirma que o modelo de erosão de sedimentos para solos não-coesivos foi introduzido pela primeira vez no FLOW-3D na versão 8.0 para simular a erosão e deposição de sedimentos sendo posteriormente conectado com a dinâmica de fluidos tridimensional, na versão 9.4, o modelo foi melhorado com a introdução de transporte de sedimentos e de várias espécies de sedimentos, concluindo assim que apesar de as simulações terem sido simuladas com sucesso, uma das principais limitações do modelo foi o tratamento aproximado da interface entre os sedimentos depositado no leito e em suspensão.

Em termos globais, e como é possível constatar pelos resultados obtidos, o software FLOW-3D apresenta-se pouco representativo em relação ao trabalho laboratorial. Se por um lado, na simulação realizada para a validação do modelo, utilizando um fundo fixo, o software apresentou um comportamento bastante adequado em termos de velocidade média, como se pode verificar na Figura 5.4, por outro lado, com a introdução do fundo móvel, os resultados obtidos no FLOW-3D afastaram-se significativamente dos resultados experimentais, apresentando desvios máximos de $\approx 30\%$. Para além disso, a introdução das caixas que constituem os detritos levaram a que o escoamento apresentasse alguma assimetria, como é possível verificar nas Figuras 5.12 e 5.13. Esta assimetria foi desvalorizada pois considerou-se que resulta dos trocos não estarem simetricamente posicionados. Já as discrepâncias nos

resultados da profundidade máxima das cavidades de erosão não podem ser depreciadas. Esta discrepância poderá estar associada às diferentes formas de avaliação da condição de movimento incipiente ou de início de movimento do transporte sólido. A avaliação desta condição constitui-se de extrema relevância como resposta do leito à passagem do escoamento, nomeadamente, em estudos que envolvam a avaliação das erosões localizadas que se desenvolvem juntos de estruturas bem como na definição de medidas de proteção. Os erros associados à sua avaliação poderá ser uma das causas de dispersão entre resultados experimentais de diversos estudos conhecidos. Esses erros resultam da subjetividade inerente à sua avaliação (Fael, 2007). Aspeto também extensível à análise numérica.

No trabalho experimental de Dias (2018) essa condição foi avaliada como uma média entre os critérios de Neil (1967) e Garde (1970), enquanto que, no FLOW-3D ela foi estimada através do método de Shields (1936). Os valores obtidos pelos três métodos apresentam-se resumidos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Comparação dos valores de U_c e respetivos caudais

	NEIL (1967)	GARDE (1970)	SHIELDS (1936)
$U_c (ms^{-1})$	0,314	0,326	0,403
$Q (l/s^{-1})$	39,1	40,6	50,1

Como se pode verificar o valor de início do movimento considerado por Dias (2018) é $\approx 20\%$ inferior ao adotado pelo FLOW-3D. Uma vez que o caudal considerado na simulação foi o adotado por Dias (2018), correspondente a 96% de U_c , quando simulado no FLOW-3D conduz, certamente, a valores inferiores correspondentes à mesma ordem de grandeza.

Por fim, foi realizado um trabalho experimental no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas da Universidade da Beira Interior utilizando a velocidade e o caudal obtidos através do parâmetro de Shields. Realizou-se também uma nova simulação numérica, apenas com o pilar isolado, para se puder comparar os resultados e verificar se os desvios da comparação com Dias (2018), se deviam à introdução do caudal e da velocidade de menor valor, uma vez que foram calculados utilizando a fórmula de Neil. Na Figura 5.29 representa-se essa comparação de resultados, onde é possível constatar que a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão, através da simulação numérica, expõe o mesmo andamento obtido experimentalmente. Dos valores obtidos numericamente, verifica-se que são inferiores aos obtidos experimentalmente, apresentando assim uma média de desvios percentuais de $12,6\%$, valor bastante considerável visto que na comparação com Dias (2018) se obteve um desvio de $\approx 30\%$.

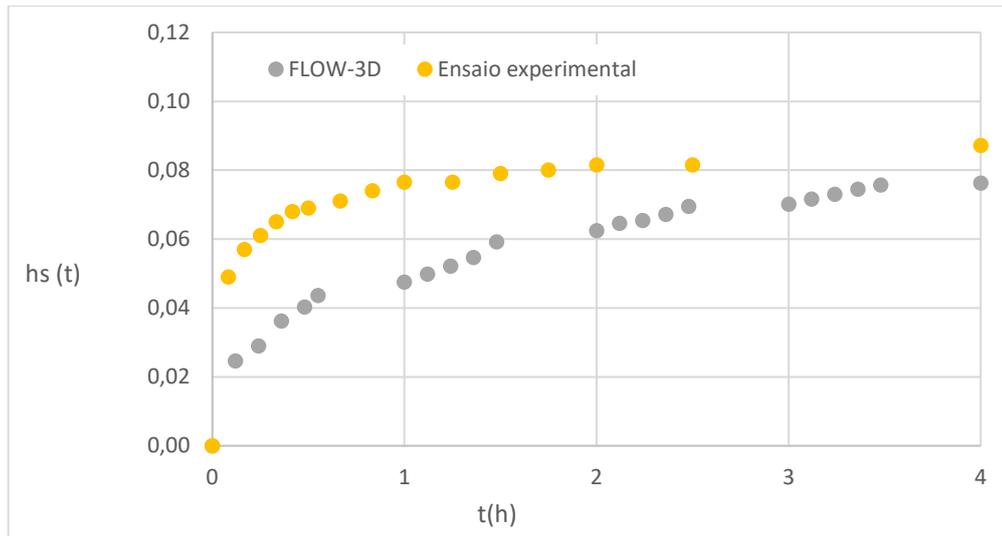


Figura 5.29 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão - Pilar isolado

CAPÍTULO 6 - Considerações finais

6.1 Conclusões

A presente dissertação pretende contribuir para alargar o conhecimento sobre a influência que os detritos têm na profundidade das cavidades de erosão junto de pilares cilíndricos, para escoamentos sem transporte sólido generalizado, recorrendo à modelação numérica, utilizando para o efeito o programa FLOW-3D.

Neste âmbito, foi realizada a modelação numérica do canal hidráulico existente no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas da Universidade da Beira Interior. A primeira fase do teve como objetivo calibrar o modelo computacional com o modelo experimental e validar os resultados obtidos pela simulação numérica, tomando as análises de sensibilidade um papel essencial na compreensão da influência de certas opções numéricas sobre os resultados obtidos e na garantia da fiabilidade desses mesmos resultados; a segunda fase visou analisar o impacto causado pelos detritos nas cavidades de erosão. Para isso, foram realizadas 5 simulações: a primeira com um pilar isolado, sem a presença de detritos, e as seguintes com a presença de detritos nas suas formas mais comuns, triangular e retangular. Realça-se a particular importância em assumir um compromisso entre a qualidade dos resultados e o tempo de cálculo. Devido à natureza empírica da teoria dos sedimentos e outras aproximações, como as dos modelos de turbulência, a calibração de parâmetros pode ser necessária em aplicações para obter os melhores resultados.

Ao longo do processo de calibração e validação, os resultados numéricos aproximaram-se em geral dos resultados verificados em modelo físico, nomeadamente, da comparação efetuada para os valores de velocidade há a realçar a boa correspondência dos resultados apresentando uma média dos desvios percentuais de 3,35 %.

Analisando os resultados obtidos pelo software FLOW-3D e tendo em consideração a evolução temporal da profundidade máxima das cavidades de erosão pode-se concluir que a forma e posição dos detritos tem bastante influência na cavidade de erosão. Pode-se concluir também que a caixa de forma retangular na superfície foi a que apresentou valores maiores de profundidade de erosão, já a caixa de forma triangular com os detritos no fundo, junto ao leito, atuou como uma medida de prevenção no desenvolvimento da profundidade máxima da cavidade de erosão.

Em comparação com os resultados de Dias (2018), a simulação com pilar isolado, a simulação da caixa de forma triangular na superfície e a simulação da caixa de forma retangular na superfície apresentam um andamento similar aos obtidos experimentalmente, mas com uma

diferença de $\approx 30\%$. Já as caixas de forma triangular no fundo e retangular no fundo apresentam uma diferença de $\approx 20\%$.

Embora vantajoso do ponto de vista económico, e apesar de apresentar um andamento similar aos resultados obtidos experimentalmente, esta solução apresenta o inconveniente de gerar valores de profundidade da cavidade de erosão bastante díspares dos valores obtidos experimentalmente o que põe em causa a fiabilidade da sua utilização na estimação da profundidade das cavidades de erosão em projeto.

6.2 Trabalhos Futuros

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre a modelação numérica, sobretudo no que concerne ao cálculo da profundidade da cavidade de erosão, indicam-se algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Realizar um número superior de simulações com o objetivo de obter um maior termo de comparação entre simulações;
- Utilização de diferentes tipos de material de fundo, utilizando o software Flow-3D, com vista a compreender melhor o comportamento do sedimento;
- Testar as simulações presentes nesta dissertação em diferentes softwares com vista a perceber o comportamento da profundidade da cavidade de erosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrunhosa, J. D. M. e Nieckele, A. (2004). “Simulação do Problema do Degrau com Rans e Les”. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 9, N.º 3.

Anderson, J. (1995). “Computational Fluid Dynamics - The Basics With Applications, McGraw-Hill”.

Azevedo, A. (2011). “Estudos preliminares sobre ejeção de vórtices em torno de um cilindro no regime turbulento com separação laminar”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP.

Azevedo, M. L. (2014). “Redução da Erosão Localizada de Pilares de Pontes Recorrendo a Ranhuras: Evolução Temporal e Configuração das Cavidades de Erosão Localizada”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho.

Baykal, C., Sumer, B. M., Fuhrman, D. R., Jacobsen, N.G. e Fredsøe (2015). “Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder”.

Blasek, J. (2001). “Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier”. Amesterdão.

Bonoa, G., Lyrrab, P. e Bonoa, G. (2011). “Solução numérica de escoamentos incompressíveis com simulação de grandes escalas”. Mecânica Computacional, Vol XXX, 1-4 Novembro, Rosario.

Brandão, L. A. P. (2015). “Modelação Numérica 3D de Escoamentos em Descarregadores de Cheias, Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada”. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Brethour, J. e Burnham, J., (2010) “Modeling Sediment Erosion and Deposition with the FLOW-3D Sedimentation & Scour Model”. Flow Science.

Breusers, H. N. C. e Raudkivi, A. J. (1991). « *Scouring, Hydraulics Structures Design Manual* », IAHR A.A. Balkema ed., Rotterdam.

Brito, L. R. (2011). “Estudo Experimental de Erosões Localizadas Junto de Pilares Complexos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Calçada, R. J. G. (2012). “Estudo de erosões localizadas causadas por pilares com geometria complexa”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.

Canilho, H. D. L. (2016). “Estudo da Influência da Forma do Esporão no Campo de Escoamento”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior.

Cardoso, R. A. F. (2008). “Infraescavação em Pilares de Pontes”. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

Carneiro, C. D. F. (2015). “Estudo Numérico do Escoamento e Transporte de Sedimentos em Torno de Pilares de Pontes”. Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Escola de Engenharia.

Chiew, Y. M. (1984). “*Local scour at bridge piers*”, Report No. 355, School of Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 200pp, 1984.

Couto, L. T. e Cardoso, A. H. (2001). “Erosões Localizadas junto de Encontros e Pilares de Pontes”. Parte I - Caracterização da situação de referência, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, APRH, vol. 22, nº 1, pp. 65-74.

Dias, A. J. P. (2018). “Estudo do impacto dos detritos nas cavidades de erosão junto de pilares de pontes”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior.

Diehl, T. H. (1997). “Potential Drift Accumulation at Bridges”. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center, Virginia.

Ettema, R. (1980). “Scour at bridge piers”. Report no. 216, University of Auckland, Auckland, New Zealand.

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

Flow Science, I. (2016). FLOW-3D User’s Manual. Version 11.2.

Fortuna, A. O. (2000). “Técnicas Computacionais para dinâmica dos Fluidos, Conceitos Básicos e Aplicações”. Universidade de São Paulo, Brasil.

Garde, R. J. (1970). “Initiation of Motion a Hydrodynamically Rough Surface - Critical Velocity Approach”.

- Ghasemi, M. e Soltani-Gerdefaramarzi, S. (2017).** “The Scour Bridge Simulation around a Cylindrical Pier Using Flow-3D”. Ph.D. Student of Water Engineering, Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Iran.
- Gonçalves, N. D. F. (2007).** “Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas”. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- Kattell, J. e Eriksson, M. (1998).** “Bridge scour evaluation: Screening, analysis and .. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas, CA.
- Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W., e Clopper, P. E. (2010).** “Impacts of Debris on Bridge Pier Scour”. Ayres Associates Inc, 3665 JFK Parkway, Building 2, Suite 200, Fort Collins.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J. P. e Cardoso, A. H. (2012).** “ Effect of spacing and skew-angle on clear-water scour at pier alignments”.
- Laursen, E., e Toch, A. (1956).** “Scour around bridge piers and abutments”. Bulletin No. 4, Iowa Highway Research Board.
- Leite, F .L. F. C. (2013).** “Estudo Experimental do Efeito de Ranhuras na Erosão Localizada na Vizinhaça de Pilares de Pontes Circulares e Alongados”. Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- Li, G., Lang, L. e Ning, J. (2013).** “3D Numerical Simulation of Flow and Local Scour around a Spur Dike”.
- Lima, M. M. C. L. (2008).** “Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes”. Universidade do Minho.
- Mehnfard, M. A., Dalfardi, S., Baghdadi, H. e Seirfar, Z. (2014).** “Simulation of local scour caused by submerged horizontal jets with Flow-3D numerical model” Javid Institute of High Education, Jiroft, Iran, department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Kerman, Iran.
- Melville, B. W. e Coleman, S. E. (2000).** “Bridge Scour” Water Resources Publications, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Melville, B. W., e Dongol, D. M. (1992).** “Bridge pier scour with debris accumulation”. Journal of Hydraulic Engineering, v. 118.
- Mohamed, H. I. (2012).** “Numerical Simulation of Flow and Local Scour at Two Submerged-emergent Tandem Cylindrical Piers”. Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Vol. 41 No. 1 pp. - January2013.

Morais, V. H. P. (2015). “Modelagem Numérica e Experimental Aplicada a um Vertedouro de Superfície Composto por um Perfil Creager e um Dissipador do tipo Roller-bucket”. Campinas.

Moussa, Y. A. M., Nasr-Allah, T. H. e Abd-Elhasseb, A. (2016). “Studying the effect of partial blockage on multi-vents bridge pier scour experimentally and numerically”. Ain Shams Engineering Journal.

NCHRP REPORT 653. (2010). “Effects of Debris on Bridge Pier Scour”. National Cooperative Highway Research Program.

Neil, C. R. (1967). “ Mean-velocity Criterion for Scour of Coarde Uniform Bed-material”. Proceeding of International Association for Hydraulic Research.

Nunes, A. F. P. (2017). “Modelação computacional do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus com paredes convergentes”. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Técnico de Lisboa.

Park, J. H., Sok, C., Park, C. K. e Young Do Kim (2016). “A Study on the Effects of Debris Accumulation at Sacrificial Piles on Bridge Pier Scour: I. Experimental Results”. KSCE Journal of Civil Engineering.

Pagliara, S. e Carnacina, I. (2011). “Influence of Wood Debris Accumulation on Bridge Pier Scour”.

Pagliara, S. e Carnacina, I. (2010). “Temporal scour evolution at bridge piers: effect of wood debris roughness and porosity”.

Pinheiro, R. C. (2010). “Estudo Experimental da Erosão de Pilares de Pontes”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Ramos, C. M. (2005) - Drenagem em Infra-Estruturas de Transporte e Hidráulica de Pontes. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Ramos, P. X. C. (2012). “Modelação numérica do escoamento em torno de um pilar”. FEUP.

Ramos, P. X., Pêgo, J. P. e Maia, R. (2012). “Modelação Numérica do Escoamento em Torno de um Pilar”. 7^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente.

Raudkivi, A. J. e Ettema, R. (1983). “Clear-water scour at cylindrical piers”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 109, nº 3, pp. 338–350.

- Rezende, A. (2009).** “Análise Numérica da Bolha de Separação do escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada”. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.
- Richardson, E. V. e Davis, S.R. (2001).** "Evaluating Scour at Bridges" Fourth Edition, Hydraulic Engineering, Federal Highways Administration Publication, Washington, D.C.
- Rocha, J. S., Carmo, J. S. A. Do, Lemos, L. J. L. e Silva, V. D. da (2008).** “Pontes construídas sobre fundos aluvionares: o colapso da ponte Hintze Ribeiro”. Associação portuguesa de recurso hídricos Vol. 29, n. 2.
- Robalo, R. M. T. (2014).** “Influência da permeabilidade de elementos cilíndricos verticais no comportamento do escoamento”. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior.
- Shields, A. F. (1936).** “Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement” vol 26.
- Silva, R. P. S. N. (2008).** “Estudo da Erosão de Pilares de Pontes”. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- Silva, M. R. (2013).** “Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheias com escoamento em superfície livre. Descarregador complementar de Salamonde”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Técnico de Lisboa.
- Tyler, R. N. (2011).** “River Debris: Causes, Impacts, and Mitigation Techniques”. Prepared for Ocean Renewable Power Company By the Alaska Center for Energy and Power.
- Vasquez, J. A. e Walsh, B.W. (2009).** “CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow”. Northwest Hydraulic Consultants, 30 Gostick Place, North Vancouver, BC, Canada.
- Wei, G., Brethour, J., Grünzner, M. e Burnham, J. (2014).** “Sedimentation Scour Model”. Flow Science Report.
- Zhao, M.; Cheng, L.; e Zang, Z. (2010).** "Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents.", Coastal Eng.
- Zevenbergen, L.W., Lagasse, P. F. e Clopper, P.E. (2007).** “Effects of Debris on Bridge Pier Scour”. Ayres Associates Inc, 3665 JFK Parkway, Bldg. 2, Suite 200, Fort Collins.