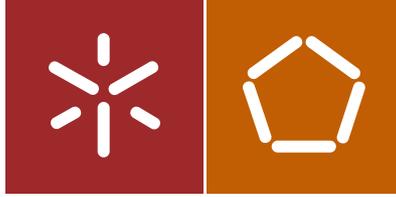




Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Cláudio Daniel Ferreira Carneiro

Estudo Numérico do Escoamento e  
Transporte de Sedimentos em  
Torno de Pilares de Pontes



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Cláudio Daniel Ferreira Carneiro

Estudo Numérico do Escoamento e  
Transporte de Sedimentos em  
Torno de Pilares de Pontes

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação de  
Professora Doutora Maria Manuela Carvalho de Lemos  
Lima  
Professor Doutor José Luís Silva Pinho

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Professora Doutora Manuela Lima, orientadora desta dissertação, por todo o apoio, disponibilidade e orientação fornecida ao longo da realização desta dissertação.

Agradeço igualmente ao Professor Doutor José Luís Pinho, coorientador desta dissertação, por todo o apoio disponibilidade e conhecimento transmitido acerca do *software* utilizado na realização desta dissertação.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos, com quem partilhei esta jornada e que estiveram presentes nos bons momentos, bem como nos menos bons.

Agradeço a todos os docentes, com quem tive a oportunidade de aprender, pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço à Universidade do Minho, por me ter recebido nestes 5 anos, o que me permitiu desenvolver não só intelectualmente, mas também a nível pessoal.

Agradeço aos meus padrinhos e família, por tudo o apoio e força que me foram dando ao longo do meu percurso académico.

Por fim, gostava de agradecer aos meus pais, que sempre me deram todas as condições e incentivos que me ajudaram imenso na minha formação.



## RESUMO

As pontes, dependendo da sua estrutura, podem possuir os seus pilares fundados no leito de rios. Com o surgimento destes elementos nos leitos dos rios ocorrem alterações no escoamento típico do rio, acentuando-se assim o transporte de sedimentos na proximidade dos pilares, fenómeno usualmente designado por erosão localizada. A erosão localizada de pilares de pontes assume elevada importância no que diz respeito à segurança de pontes, pois pode comprometer a sua estabilidade estrutural, ou mesmo ser uma possível causa do colapso.

A presente dissertação teve como objetivo efetuar um estudo numérico do comportamento do escoamento em torno de um pilar, bem como efetuar o estudo numérico do transporte de sedimentos em torno do mesmo pilar. Assim o estudo foi efetuado recorrendo ao *software* de modelação numérica *Delft3d*.

Foi simulado o escoamento no canal hidráulico do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade do Minho, recorrendo a resultados experimentais para a validação do modelo. Foram simulados quatro cenários diferentes. O primeiro cenário teve por objetivo calibrar o modelo e validar os resultados obtidos a nível hidrodinâmico, enquanto o segundo cenário permitiu definir os resultados obtidos como um padrão para posterior comparação. Os outros cenários analisaram a influência da existência de ranhuras nos pilares como medida de alteração de escoamento com o objetivo de reduzir a erosão localizada.

Os resultados obtidos permitiram constatar que é na zona a montante do pilar que ocorre a erosão, e observar a diminuição da velocidade com o aproximar do pilar, bem como, a sobre elevação da superfície livre. Já na zona a jusante do pilar o *software* apresentou algumas limitações ao nível do tratamento de sedimentos, sendo que na zona onde seria de se esperar que ocorresse também erosão apenas se observa sedimentação.

A introdução de ranhuras no pilar originaram pequenas alterações no escoamento, observando-se todos os fenómenos que se verificam sem a introdução das mesmas. Foi possível concluir que a introdução de ranhuras, com a configuração das do presente estudo, não constitui uma medida eficaz no combate ao fenómeno da erosão localizada verificada na proximidade de pilares de pontes.

### **Palavras-chave:**

**Erosão localizada, Modelação numérica de escoamentos, *Delft3d*, Transporte sólido**



**ABSTRACT**

Bridges, depending on their structure, can have their piers founded in a bed of sediments. This originates changes in a typical river flow that cause sediment transport in proximity of the pier, a phenomenon usually referred as scour. Bridge piers scour assumes great importance in what concerns the safety of bridges, and may therefore compromise their structural stability, or even be a possible cause of their collapse.

This work aims to provide a numerical study of the flow around a pier as well as the study of sediment transport around the same pier. The study was performed using the numerical modelling *software* Delft3D.

The flow in the hydraulic channel of Hydraulics Laboratory and Water Resources at the University of Minho was simulated, using experimental data to validate the model. Four different scenarios were simulated. The first scenario aimed to calibrate the model and validate the hydrodynamic results obtained, while the second scenario allowed to define the results as a standard for comparison. The other scenarios examined the influence of presence of slots in the flow trying reduce the localized erosion.

The results showed that it is in the area upstream of the pier that erosion occurs. In this regions the decrease of main stream velocity, as the flow approaches the pier, is observed as well as the elevation of the free surface. In the downstream area of the pier, *software* evidenced some limitations in what concerns sediment transport, and in the area where one would also expect erosion to occur, only sedimentation was observed.

The introduction of slots in the pier produced minor changes in the flow, verifying all the phenomena that occur without their introduction. So it can be concluded that the introduction of slots, with the configuration adopted in the present study, does not appear to be an effective measure to mitigate the phenomenon of bridge piers scour.

**Key-words:****Scour, Numerical modelling of flows, Delft3D, Sediment transport**



**Índice de texto**

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM TORNO DE PILARES DE PONTES.....	1
1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO .....	2
1.3 METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO .....	3
1.3.1 <i>Estrutura da dissertação</i> .....	4
<b>2 ESTADO DE ARTE</b> .....	<b>5</b>
2.1 ESTUDO DO ESCOAMENTO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM TORNO DE PILARES DE PONTES.....	5
2.1.1 <i>Escoamento em torno de pilares de pontes</i> .....	6
2.1.2 <i>Forças Hidrodinâmicas atuantes no pilar</i> .....	12
2.1.3 <i>Tensões no Fundo</i> .....	15
2.2 TRABALHOS REALIZADOS SOBRE MODELAÇÃO NUMÉRICA DE DINÂMICA DE FLUIDOS E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	16
<b>3 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE DINÂMICA DE FLUIDOS</b> .....	<b>21</b>
3.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DE ESCOAMENTO DE FLUIDOS.....	23
3.1.1 <i>Conservação da Massa</i> .....	23
3.1.2 <i>Conservação da Quantidade de Movimento</i> .....	23
3.2 ESCOAMENTOS TURBULENTOS.....	24
3.2.1 <i>Variáveis Características da Turbulência</i> .....	24
3.3 MODELOS DE RESOLUÇÃO NUMÉRICA.....	25
3.3.1 <i>Modelos baseados nas Equações Medias de Reynolds, RANS</i> .....	25
3.3.2 <i>Método da Simulação das Grandes Escalas da Turbulência, LES</i> .....	28
3.3.3 <i>Simulação Numérica Direta, DNS</i> .....	28
3.4 MÉTODOS PARA DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL .....	29
3.5 MALHAS.....	30
<b>4 METODOLOGIA UTILIZADA PARA A SIMULAÇÃO DO CASO DE ESTUDO</b> .....	<b>33</b>
4.1 PROCEDIMENTO GERAL E SOFTWARE UTILIZADO.....	33
4.2 METODOLOGIA PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO .....	34

4.2.1	<i>Apresentação das simulações</i> .....	34
4.2.2	<i>Definição da geometria do problema</i> .....	36
4.2.3	<i>Geração da malha</i> .....	38
4.2.4	<i>Definição Hidrodinâmica do problema</i> .....	40
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>53</b>
5.1	CONCEITOS GERAIS.....	53
5.2	SIMULAÇÃO 1.....	53
5.2.1	<i>Campo de Velocidades e vorticidade do escoamento</i> .....	53
5.2.2	<i>Variação da superfície livre</i> .....	57
5.2.3	<i>Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos</i> .....	58
5.3	SIMULAÇÃO 2.....	59
5.3.1	<i>Campo de Velocidades e vorticidade do escoamento</i> .....	59
5.3.2	<i>Variação da superfície livre</i> .....	62
5.3.3	<i>Comportamento dos sedimentos</i> .....	63
5.4	SIMULAÇÃO 3.....	64
5.4.1	<i>Campo de Velocidades e vorticidade do escoamento</i> .....	65
5.4.2	<i>Variação da superfície livre</i> .....	68
5.4.3	<i>Comportamento dos sedimentos</i> .....	69
5.5	SIMULAÇÃO 4.....	70
5.5.1	<i>Campo de Velocidades e vorticidade do escoamento</i> .....	70
5.5.2	<i>Variação da superfície livre</i> .....	74
5.5.3	<i>Comportamento dos sedimentos</i> .....	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>77</b>
6.1	ASPETOS GERAIS E CONCLUSÕES.....	77
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	78
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>79</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>85</b>

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Variação do padrão de desprendimento de vórtices em esteira em função do $Re$ (adaptada de Pinto (2008))	10
Tabela 2.2 - Tabela resumo dos resultados de Ramos (2012)	19
Tabela 4.1 - Apresentação sucinta dos casos de estudo	36

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Evolução da profundidade da cavidade de erosão localizada em fundos arenosos em função do tempo (Richardson e Davies, apud Azevedo (2014))	6
Figura 2.2 - Alteração do campo de pressões do escoamento a montante de um pilar (Fael, 2007)	8
Figura 2.3 - Escoamento resultante para pilares de pontes (Breusers & Raudkivi, apud Ramos (2012))	8
Figura 2.4 - Separação do escoamento ao redor de um pilar circular (Pinto, 2008)	10
Figura 2.5 - Relação entre o número de <i>Strouhal</i> e o número de <i>Reynolds</i> (Sumer & Fredsoe, 1997)	11
Figura 2.6 - Desprendimento de atração dos vórtices (Sumer & Fredsoe, 1997)	12
Figura 2.7 - Direção das componentes da força hidrodinâmica atuante no pilar (White, 2006)	13
Figura 2.8 - Variação de $C_D$ com o número de <i>Reynolds</i> (White, 2006)	14
Figura 2.9 - Variação de $C_L$ com $Re$ (Sumer & Fredsoe, 1997)	14
Figura 2.10 - Diagrama de <i>Shields</i> (Quintela, 2000)	15
Figura 2.11 - Resultados de <i>Zhao et al. (2010)</i> . Esquerda: Linhas de corrente em volta do pilar. Direita: Leito após 3 horas	17
Figura 2.12 - Exemplo de resultados obtidos por <i>Simoons</i> (2012)	17
Figura 2.13 - Configurações usadas por Ramos (2012)	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Figura 3.1 - Tipos de malhas (adaptado de Anderson (1995))	30
Figura 3.2 - Exemplo de malha ortogonal (Gonçalves, 2007)	31
Figura 3.3 - Exemplo de malha não ortogonal (Gonçalves, 2007)	31
Figura 3.4 - Exemplo de malha não estruturada (Gonçalves, 2007)	32
Figura 4.1 - Menu inicial do <i>software</i> Delft3D	34

Figura 4.2 - Esquema do canal hidráulico (1-Reservatório; 2- Secção de jusante; 3-Painel de controlo; 4- Válvula; 5- bomba centrífuga; 6- Medidor de Caudal; 7-Secção de teste; 8- Ajuste da inclinação longitudinal; 9- Secção de montante) (Leite E. P., 2010).....	34
Figura 4.3 - Diferentes configurações adotadas para o pilar (pilar alongado de extremidades semicirculares (a), pilar alongado de extremidades semicirculares com ranhura (b), pilar alongado de extremidades semicirculares com duas ranhuras (c)) .....	36
Figura 4.4 - Sub-menu para criação da geometria e malha.....	37
Figura 4.5 - Geometria a utilizar na simulação .....	37
Figura 4.6 - Malha obtida a utilizar na simulação.....	38
Figura 4.7 - Pormenor da malha na zona do pilar .....	38
Figura 4.8 - Pormenor da malha na zona do pilar .....	39
Figura 4.9 - Pormenor da seleção dos pontos secos.....	39
Figura 4.10 – Submenu para a definição hidrodinâmica do problema .....	40
Figura 4.11 – Menu <i>Flow input</i> primeiro submenu <i>Description</i> .....	41
Figura 4.12 - Submenu <i>Grid parameters</i> .....	41
Figura 4.13 - Submenu <i>Bathymetry</i> .....	42
Figura 4.14 - Submenu <i>Dry points</i> .....	43
Figura 4.15 - Submenu <i>Time frame</i> .....	44
Figura 4.16 - Submenu <i>Processes</i> .....	44
Figura 4.17 - Submenu <i>Initial conditions</i> .....	45
Figura 4.18 - Submenu <i>Boundaries</i> .....	45
Figura 4.19 - Representação das fronteiras do canal .....	46
Figura 4.20 - Condições impostas na extremidade esquerda do canal.....	46
Figura 4.21 - Submenu <i>Physical parameters</i> aba <i>Constants</i> .....	47
Figura 4.22 - Sub-menu <i>Physical parameters</i> aba <i>Roughness</i> .....	48
Figura 4.23 - Submenu <i>Physical parameters</i> aba <i>Viscosity</i> .....	48
Figura 4.24 - Submenu <i>Numerical parameters</i> .....	49
Figura 4.25 - Submenu <i>Monitoring</i> aba <i>Observations</i> .....	50
Figura 4.26 - Seleção dos pontos de observação .....	50
Figura 4.27 - Submenu <i>Output</i> aba <i>Storage</i> .....	51
Figura 5.1 - Campo de velocidades médias após 29 minutos .....	53
Figura 5.2 - Vorticidade do escoamento após 29 minutos .....	54
Figura 5.3 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 18 minutos .....	54
Figura 5.4 - Campo de velocidades médias após 2 horas e 4 minutos.....	55

Figura 5.5 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 18 minutos.....	55
Figura 5.6 - Vorticidade do escoamento após 2 horas e 7 minutos.....	55
Figura 5.7 - Campo de velocidades verticais a 0,05cm do fundo após 51 minutos .....	56
Figura 5.8 - Campo de velocidades verticais a 0,25cm do fundo após 51 minutos .....	56
Figura 5.9 - Campo de velocidades verticais a 0,05cm do fundo após 1 hora e 44 minutos....	56
Figura 5.10 - Campo de velocidades verticais a 0,25cm do fundo após 1 hora e 44 minutos..	57
Figura 5.11 - Variação da profundidade.....	57
Figura 5.12 - Campo de velocidades médias após 51 minutos.....	59
Figura 5.13 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 18 minutos.....	60
Figura 5.14 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 44 minutos.....	60
Figura 5.15 - Número de <i>Froude</i> do escoamento após 1 hora e 18 minutos.....	61
Figura 5.16 - Vorticidade do escoamento após 54 minutos .....	61
Figura 5.17 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 18 minutos.....	62
Figura 5.18 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 44 minutos.....	62
Figura 5.19 - Variação da profundidade.....	62
Figura 5.20 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 18 minutos ...	63
Figura 5.21 - Pormenor da sedimentação/erosão na proximidade do pilar após 1 hora e 18 minutos .....	63
Figura 5.22 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 18 minutos .	64
Figura 5.23 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 44 minutos .	64
Figura 5.24 - Campo de velocidades médias após 51 minutos.....	65
Figura 5.25 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 18 minutos.....	65
Figura 5.26 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 44 minutos.....	66
Figura 5.27 - Número de <i>Froude</i> do escoamento após 1 hora e 18 minutos.....	66
Figura 5.28 - Vorticidade do escoamento após 51 minutos .....	67
Figura 5.29 - Pormenor da vorticidade na proximidade do pilar após 2 hora e 4 minutos .....	67
Figura 5.30 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 18 minutos.....	68
Figura 5.31 - Vorticidade do escoamento após 1 hora 43 minutos .....	68
Figura 5.32 - Variação da profundidade.....	68
Figura 5.33 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 51 minutos .....	69
Figura 5.34 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 18 minutos .	69
Figura 5.35 - Pormenor da sedimentação/erosão no pilar após 1 hora e 18 minutos .....	70
Figura 5.36 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 44 minutos .	70
Figura 5.37 - Campo de velocidades médias após 51 minutos.....	71

Figura 5.38 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 18 minutos .....	71
Figura 5.39 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 44 minutos .....	71
Figura 5.40 - Número de <i>Froude</i> do escoamento após 1 hora e 18 minutos .....	72
Figura 5.41 - Vorticidade do escoamento após 51 minutos .....	72
Figura 5.42 - Pormenor da vorticidade na proximidade do pilar após 1 hora e 17 minutos ....	73
Figura 5.43 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 18 minutos .....	73
Figura 5.44 - Vorticidade do escoamento após 1 hora 44 minutos .....	74
Figura 5.45 - Variação da profundidade .....	74
Figura 5.46 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 51 minutos .....	75
Figura 5.47 - Pormenor da sedimentação/erosão no pilar após 1 hora e 17 minutos.....	75
Figura 5.48 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 18 minutos .	76
Figura 5.49 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 44 minutos.	76

## Simbologia e Abreviaturas

$A_h$	Área de projeção horizontal do pilar [ $m^2$ ]
$A_v$	Área de projeção vertical do pilar [ $m^2$ ]
$C_D$	Coefficiente de arrasto
$C_L$	Coefficiente de sustentação
$C_p$	Coefficiente de pressão
$C_\mu$	Constante empírica relativa ao modelo de turbulência
$D$	Diâmetro do pilar [m]
$D_{50}$	Diâmetro mediano das partículas do material do fundo [m]
$f$	Frequência do desprendimento de vórtices [ $s^{-1}$ ]
$F_D$	Força de arrasto [N]
$F_L$	Força de sustentação [N]
$g$	Aceleração da gravidade [ $m^2/s$ ]
$h$	Altura do escoamento [cm]
$i,j,k$	Coordenadas vetoriais
$I$	Intensidade da turbulência
$k$	Energia cinética turbulenta [ $m^2/s^2$ ]
$l$	Comprimento característico de turbulência [m]
$L$	Comprimento do obstáculo na direção normal ao escoamento [m]
$p$	Pressão do fluido [Pa]
$p_\infty$	Pressão média a montante [Pa]
$Re$	Número de <i>Reynolds</i>
$St$	Número de <i>Strouhal</i>
$t$	Tempo [s]
$U(y)$	Velocidade do escoamento a uma distância $y$ do fundo [m/s]
$U$	Velocidade média do escoamento de aproximação [m/s]
$U_c$	Velocidade média crítica do escoamento de aproximação ou de início do movimento [m/s]
$X_{cr}$	Número de <i>Reynolds</i> associado ao início do movimento das partículas
$x,y,z$	Coordenadas cartesianas
$Y_{cr}$	Parâmetro de <i>Shields</i>

$u_*c$	Velocidade de atrito crítica junto ao fundo ou relativa ao início do movimento [m/s]
$U_i, U_j$	Componentes vetoriais da velocidade [m/s]
$\tau_c$	Tensão de arrastamento crítica [Pa]
$\Delta p$	Incremento de pressões [Pa]
$\varepsilon$	Taxa de dissipação turbulenta [ $m^2/s^3$ ]
$\rho$	Massa volúmica da água [ $kg/m^3$ ]
$\nu$	Viscosidade cinemática da água [ $m^2/s$ ]
$\nu_t$	Viscosidade cinemática turbulenta da água [ $m^2/s$ ]
$\omega$	Taxa de dissipação [ $m^2/s^3$ ]
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
RAM	Random Access Memory
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RNG	Modelo $k-\varepsilon$ <i>Renormalization</i>

## **1 Introdução**

### **1.1 Estudo numérico do escoamento e transporte de sedimentos em torno de pilares de pontes**

Desde sempre que o homem teve necessidade de procurar alimentos e abrigo de maneira a poder subsistir, assim sendo necessitou de transpor rios e vales entre outros obstáculos, na procura dos mesmos. Essa necessidade originou a construção das primeiras pontes, que permitiram transpor os rios e a comunicação entre os povos. As pontes, dependendo da sua arquitetura, podem possuir os seus pilares fundados no leito de rios. Com o surgimento destes elementos nos leitos dos rios ocorrem alterações no escoamento típico do rio, acentuando-se assim o transporte de sedimentos na proximidade dos pilares, fenómeno usualmente designado por erosão localizada (Richardson & Davies, 2001). A erosão localizada de pilares de pontes assume elevada importância no que diz respeito à segurança de pontes, pois pode comprometer a sua estabilidade estrutural, ou mesmo ser uma possível causa de colapso (Azevedo et al., 2014).

Não se trata de um problema atual, mas sim de um problema recorrente desde o surgimento dos primeiros pilares fundados no leito de rios. Vários são os exemplos de pontes que entraram em rutura, tendo como uma das principais causas o fenómeno de erosão localizada na vizinhança dos seus pilares ou encontros. Em Portugal, esta problemática já se fez sentir, tendo como exemplo o deslocamento do pilar central da ponte de Penacova, em 1979, que levou a estrutura metálica do tabuleiro a sofrer deformações importantes. Nos Estados Unidos da América, desde 1999 mais de 1000 pontes entraram em rutura estrutural, destas 60% dos casos deveram-se a problemas de erosão localizada (Khosronejad et al., 2012).

Apesar da existência de estudos sobre esta temática desde o final do século XX, devido a este ser um fenómeno de grande complexidade (Esmaeili et al., 2009), é necessário efetuar uma análise multidisciplinar para uma maior compreensão do fenómeno. Assim sendo são necessários não só conhecimentos hidráulicos, mas também conhecimentos a nível da geotecnia e de estruturas. Torna-se deste modo importante continuar a estudar a problemática do escoamento e transporte de sedimentos em torno de pilares de pontes.

O estudo desta problemática pode ser desenvolvido através da análise experimental dos fenómenos ou através da simulação numérica. Numa primeira fase devido a limitações tecnológicas o estudo da mesma era realizado praticamente apenas através da análise

experimental do mesmo. No entanto, com a grande evolução observada a nível tecnológico, o poder computacional aumentou permitindo deste modo a simulação de casos reais e de maior complexidade em menor tempo e com custos menores. Observou-se deste modo um aumento de estudos utilizando a simulação numérica, mesmo tendo em conta as suas limitações, tais como a necessidade de se efetuar uma validação e calibração dos modelos construídos, com vista a obter resultados mais aproximados das situações observadas (Abouzeid et al., 2006).

Na presente dissertação é abordada a problemática da erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes, sendo o estudo realizado através de simulações numéricas, de forma a se proceder à calibração e validação do modelo construído. Foram usados como base trabalhos experimentais já realizados na Universidade do Minho sobre a mesma temática (Leite (2010), Leite (2013) e Azevedo (2014)). Finalizada a fase de calibração e validação do modelo construído, foi efetuado um estudo para três diferentes configurações do pilar: uma primeira de um simples pilar alongado, sendo que nas restantes configurações foram introduzidas ranhuras no pilar. Na segunda configuração utilizou-se uma ranhura central, e na terceira configuração duas ranhuras descentralizadas. Caracterizou-se o escoamento em torno dos pilares, bem como o transporte de sedimentos associado a cada configuração.

## 1.2 Objetivos da dissertação

O objetivo geral da dissertação é a realização de um estudo numérico do escoamento e do transporte de sedimentos em torno de pilares de pontes, através da aplicação de ferramentas hidrodinâmicas para a análise do fenómeno. Para se atingir este objetivo geral são considerados os seguintes objetivos específicos:

- Construção e calibração do modelo numérico;

A construção e calibração do modelo numérico foi efetuado com recurso à ferramenta informática *DELFT3D*. Foram comparados os resultados obtidos pelo modelo com resultados de trabalhos experimentais publicados (Lima, 2014), com o objetivo de efetuar a calibração do modelo. Esta calibração do modelo é essencial para validação do modelo, aumentando assim a confiança nos resultados obtidos nas diferentes simulações.

- Caracterização do escoamento em torno de modelos de pilares de pontes;

A introdução de um pilar num escoamento permanente e uniforme, origina alterações significativas no escoamento, quer a montante, quer a jusante do pilar. Estas alterações

levam ao surgimento dos vórtices de ferradura na frente do pilar bem como ao surgimento dos vórtices de esteira na face de jusante do pilar. Além destes fenómenos forma-se também um fluxo descendente, que tem como origem a desaceleração do fluxo na frente pilar. O efeito combinado destas ações são os principais responsáveis pelo aumento do transporte de sedimentos resultando deste modo a erosão localizada nos pilares (Roulund et al., 2005).

- Caracterização do transporte de sedimentos em torno de modelos de pilares de pontes.

Caracterizado o escoamento em torno de modelos de pilares de pontes é necessário caracterizar o transporte de sedimentos originado pelo escoamento a que este está sujeito. Isto permite efetuar uma análise à configuração da cavidade de erosão localizada, possibilita o estudo para diferentes dimensões de sedimentos ou formas alternativas de pilares, de modo a minimizar o fenómeno da erosão localizada.

### **1.3 Metodologia da dissertação**

A dissertação foi iniciada com um estudo do *software* disponível para a resolução numérica de equações de movimento, e de dinâmica sedimentar. São vários os programas que poderiam ser utilizados na presente dissertação, tais como o *Fluent*, *Delft3D* e o *Flow3d*, sendo o utilizado para o desenvolvimento da mesma o *Delft3D*., uma vez que já se detém a respetiva licença de utilização.

O programa é composto por vários módulos com diferentes funções. No desenvolvimento da presente dissertação foram utilizados os seguintes módulos: *Delft3D-FLOW* e o *Delft3D-MOR*. O *Delft3D-FLOW* simula fluxos não estacionários em duas ou três dimensões, resolvendo as equações de *Navier-Stokes* para fluidos incompressíveis. Por outro lado o módulo *Delft3D-MOR* incorpora os efeitos das ondas, correntes e transporte de sedimentos na evolução morfológica, possuindo deste modo todas as valências necessárias para o desenvolvimento da dissertação.

Este *software* foi aplicado à simulação do escoamento e transporte de sedimentos em torno de pilares alongados com extremidades semicilíndricas.

### **1.3.1 Estrutura da dissertação**

Na realização desta dissertação optou-se por dividir a mesma em sete capítulos, sendo estes posteriormente subdivididos, de forma a abordar temas mais específicos.

O capítulo 1, referente à Introdução, apresenta o tema em estudo, bem como os objetivos, metodologia e organização que foram adotadas no desenvolvimento desta dissertação.

O capítulo 2 é relativo ao Estado de Arte, tendo como principal objetivo aprofundar o conhecimento sobre o escoamento e transporte de sedimentos em torno de pilares, as forças hidrodinâmicas que atuam sobre o pilar e as tensões no fundo.

No capítulo 3 são abordados os conceitos necessários para a Modelação Numérica de Fluidos, apresentando a formulação matemática e os parâmetros de escoamento, o processo de criação de malhas, bem como os diferentes modelos de resolução numérica.

No capítulo 4 é abordado o Procedimento Numérico, sendo apresentado o *software* adotado no desenvolvimento desta dissertação, bem como o método da construção de um problema genérico para a resolução numérica, que seria adotado depois na criação e simulação do caso de estudo, com cenários particulares.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados das simulações efetuadas.

No capítulo 6, Conclusões e Trabalhos Futuros, são apresentadas as conclusões retiradas da realização desta dissertação e possíveis objetivos para futuros trabalhos que possam vir a ser desenvolvidos.

## 2 Estado de Arte

Neste segundo capítulo será abordado o trabalho já desenvolvido sobre a temática. Fazendo uma análise do escoamento e transporte de sedimentos que se verifica em torno de pilares de pontes, bem como um resumo de alguns trabalhos já desenvolvidos que tiveram por base uma abordagem numérica no estudo da temática.

### 2.1 Estudo do escoamento e transporte de sedimentos em torno de pilares de pontes

Segundo Richardson e Davies (2001) a erosão é um processo provocado pela ação da corrente de escoamento, que escava e arrasta o material de leito. Esta pode ser qualificada e dividida em processo de erosão global ou localizada. A erosão global é caracterizada pelos elevados caudais, a existência de curvas ou confluências de escoamento, não sendo dependente da existência de obstáculos.

Por outro lado, a erosão localizada é caracterizada por apenas surgir junto aos obstáculos e contrações laterais do escoamento, verificando-se uma diminuição da secção do escoamento. Este fenómeno, segundo Roulund et al. (2005) e Hill e Younkin (2006), é de uma complexidade muito elevada, sendo resultante da forte interação do campo de escoamento turbulento tridimensional em redor do obstáculo com o leito de sedimentos.

A erosão localizada é dependente do tempo, podendo ocorrer sob duas condições (Richardson e Davies (2001) e Melville e Chiew (1999)):

- Erosão localizada sem transporte sólido (*clean-water scour*), que ocorre na ausência de movimento do material do fundo na zona de escoamento não perturbado, a montante do obstáculo. A tensão de arrastamento no fundo, a montante, vai ser inferior ou igual à tensão crítica de arrastamento, não se verificando deste modo a reposição do material erodido no local. O valor máximo de erosão local é atingido quando deixa de existir capacidade de remoção, sendo este valor denominado por equilíbrio estático.
- Erosão localizada com transporte sólido (*live-bed scour*), esta ocorre quando a cavidade de erosão é alimentada com material proveniente de montante. Sendo atingido o equilíbrio quando a capacidade de remoção de material é igual à capacidade de material transportado para a cavidade, este fenómeno é denominado por equilíbrio dinâmico.

Estando na presença de um caso de erosão localizada sem transporte sólido, o máximo valor para a profundidade da cavidade de erosão é atingido para um período mais longo do que no caso da erosão localizada com transporte sólido. Da análise da figura 2.1, é possível constatar ainda que a máxima profundidade da cavidade de erosão sem transporte sólido é superior em cerca de 10% à máxima profundidade de equilíbrio com transporte sólido.

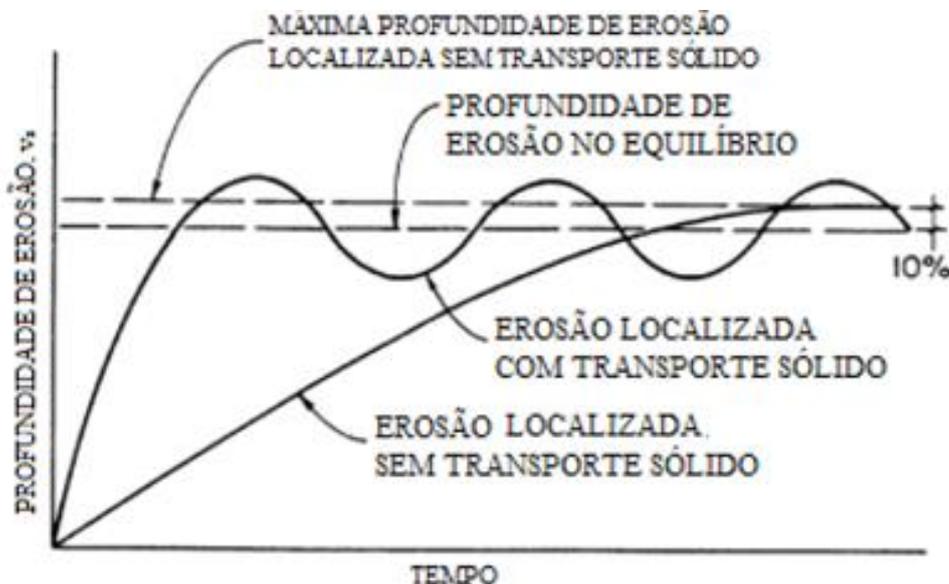


Figura 2.1 - Evolução da profundidade da cavidade de erosão localizada em fundos arenosos em função do tempo (Richardson e Davies, apud Azevedo (2014))

### 2.1.1 Escoamento em torno de pilares de pontes

A introdução de um pilar no escoamento de um rio leva ao surgimento de vários fenómenos, fenómenos esses que são abordados e estudados na área da Mecânica dos Fluidos. Deste modo o escoamento resultante da introdução dos pilares vai assim depender de vários fatores, fatores esses que segundo Couto e Cardoso (2001), podem ser agrupados em 4 diferentes categorias:

- Características geométricas dos pilares e das secções de escoamento de água;
- Características cinemáticas e dinâmicas do escoamento;
- Propriedades do fluido;
- Propriedades dos sedimentos

Na categoria das características geométricas os parâmetros a considerar passam pelo diâmetro do pilar, comprimento do pilar, ângulo de alinhamento do pilar com o escoamento, coeficiente de forma do pilar, altura de água do escoamento, largura da secção transversal do canal, declive

do fundo do canal e o coeficiente da secção transversal. Quanto às características cinemáticas e dinâmicas os parâmetros são: a velocidade média de aproximação, a perda de carga unitária do escoamento e a aceleração da gravidade. A viscosidade cinemática, e a massa volúmica, são os parâmetros a considerar na categoria das propriedades do fluido. No caso das propriedades dos sedimentos os parâmetros a considerar são a massa volúmica, o diâmetro médio e o coeficiente de graduação da curva granulométrica.

Com a introdução de um pilar o campo de velocidades do escoamento vai sofrer uma variação, e como resultado desta interação entre o fluido em movimento e a fronteira de fundo móvel, vai surgir o transporte sólido, e associado a este a erosão. Esta interação pode ser classificada de três diferentes modos: estável, quando as forças induzidas pelo escoamento são insuficientes para provocar erosão quer no leito ou nas margens; dinamicamente estável, no caso de as forças induzidas pelo escoamento causarem um movimento no leito, sendo possível observar o fenómeno de erosão e transporte dos sedimentos; e por fim esta interação pode ser classificada como instável, sendo que esta situação ocorre quando estamos na presença de um grande volume de transporte de sedimentos causado pelas forças do escoamento, provocando assim uma erosão acentuada (Leite, 2013).

Assim, é possível verificar que, de um modo geral, à medida que o escoamento se aproxima do pilar, a sua velocidade vai diminuindo, até se aproximar da face de montante do pilar onde a sua velocidade será nula. Este fenómeno é denominado por efeito de estagnação, sendo este o responsável por um aumento da pressão,  $\Delta p$ , obtido pela equação 2.1 (Ramos, 2012):

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

em que  $\rho$  representa a massa volúmica da água e  $U(y)$  a velocidade do escoamento à distância  $y$  do fundo do rio ou canal.

Esta variação no campo de pressões (figura 2.2) é tanto maior quanto maior for a diminuição da velocidade na direção vertical, provocando deste modo um diferencial de pressões na face de montante do pilar. Como consequência desta variação no campo de pressões entre a superfície livre e o fundo, verifica-se um aumento do nível da superfície livre a montante do pilar, surgindo assim a superfície de enrolamento. Forma-se igualmente um escoamento descendente sobre a forma de jato, tendo o sentido das maiores pressões para as menores pressões, sendo este, um possível responsável pelo início do processo erosivo (Fael, 2007).

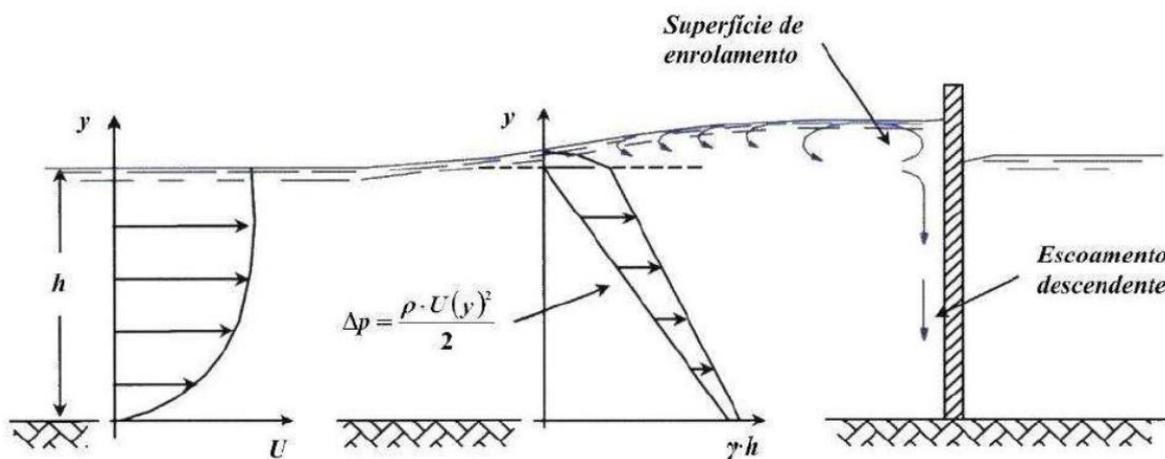


Figura 2.2 - Alteração do campo de pressões do escoamento a montante de um pilar (Fael, 2007)

Esta diferença de pressões vai provocar não só o surgimento da superfície de enrolamento mas como vai originar uma separação do escoamento junto ao fundo, ligeiramente a montante do pilar e nas suas superfícies laterais. A separação da camada limite juntamente com o escoamento descendente forma um vórtice em ferradura imediatamente a montante do pilar (figura 2.3), o qual poderá ser outro fenómeno causador do início da erosão (Cardoso, 1998).

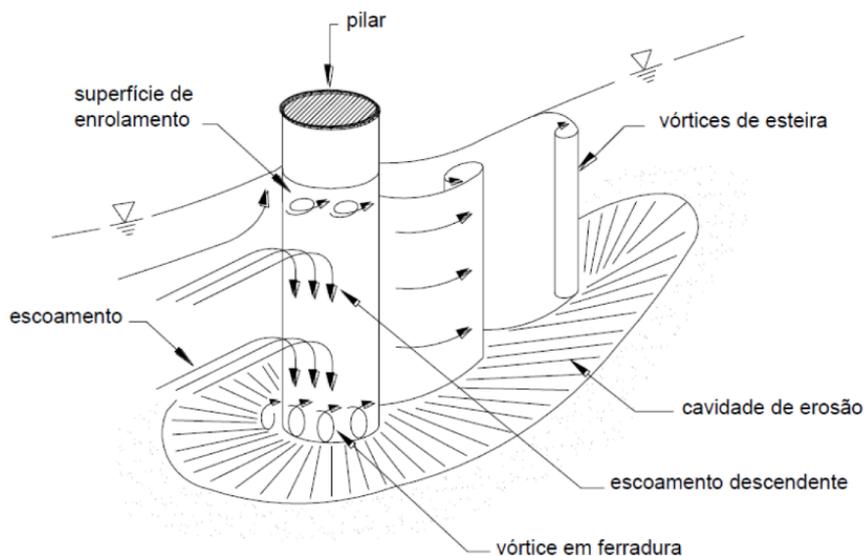


Figura 2.3 - Escoamento resultante para pilares de pontes (Breusers & Raudkivi, apud Ramos (2012))

Os sedimentos libertados pelo processo erosivo podem assim vir a ser transportados de dois modos distintos. Estes podem rolar ou deslizar sobre o fundo, este tipo de transporte de

sedimentos é designado por transporte por arrastamento. Em alternativa podem seguir em suspensão na massa de água, sendo desta o forma o transporte designado por transporte em suspensão.

Com a presença do pilar, como ocorre a separação do escoamento à sua volta, pode surgir alguma instabilidade no escoamento (Sumer & Fredsoe, 1997). Instabilidade essa que pode ser avaliada através do número de *Reynolds* ( $Re$ ), assim é possível classificar o escoamento em três diferentes regimes:

- Regime Laminar;
- Regime de Transição;
- Regime Turbulento.

O número de *Reynolds* é um parâmetro adimensional que relaciona as forças viscosas com as forças de inércia. É um parâmetro importante no que diz respeito ao escoamento à volta do pilar, sendo o mesmo dado pela equação 2.2 (White, 2006):

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

onde  $D$  representa o diâmetro do pilar circular,  $U$  a velocidade média do escoamento de aproximação e  $\nu$  a viscosidade cinemática da água.

Da análise da figura 2.4 é possível verificar que no princípio as partículas do fluido sofrerão uma aceleração entre as posições D e E, sofrendo uma desaceleração entre os pontos E e F. Deste modo as partículas em F terão uma velocidade aproximadamente igual à que tinham na posição D. Ou seja, entre D e E vai ocorrer uma conversão da energia de pressão em energia cinética. Por outro lado, entre E e F é possível constatar que se verifica o oposto. Todas estas transformações de energia vão ser assim transmitidas para as partículas de fluido que se movem próximo à parede do pilar, através da interação entre a camada limite e o escoamento externo (Pinto, 2008).

Com o aumento do número de *Reynolds*, as tensões viscosas aumentam também. Deste modo, entre as posições D e E, a energia cinética das partículas vai ser consumida, sendo a restante energia das partículas insuficiente para descrever a mesma trajetória entre as posições E e F.

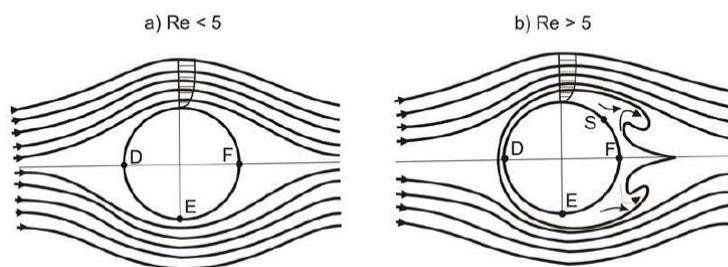


Figura 2.4 - Separação do escoamento ao redor de um pilar circular (Pinto, 2008)

Este fenómeno, juntamente com a pressão exercida sobre a partícula pelo escoamento externo, leva à separação da camada limite nos dois lados do cilindro. Como resultado desta separação, surgem duas camadas de corte a jusante do pilar, das quais resultam dois vórtices de sinais opostos, que formam um determinado padrão de desenvolvimento para jusante, dependendo do número de *Reynolds* (Pinto, 2008). A relação entre vórtices e número de *Reynolds* é destacada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Variação do padrão de desprendimento de vórtices em esteira em função do *Re* (adaptada de Pinto (2008))

<i>Re</i>	Padrão de vórtices	Regime
<5		Regime sem separação
5 a 40		Um par de vórtices fixo
40 a 150		Desprendimento de vórtices com uma esteira laminar
150 a 300		Transição à turbulência da esteira de vórtices
300 a $3 \times 10^5$		Esteira de vórtices completamente turbulenta
$3 \times 10^5$ a $3,5 \times 10^6$		Transição à turbulência da camada limite e esteira de vórtices é estreita e desorganizada
$>3,5 \times 10^6$		A esteira de vórtices é restabelecida

Segundo Pereira (2010), os escoamentos podem apresentar características que variam no tempo com uma periodicidade bem definida. No caso dos vórtices são instáveis quando expostos a pequenas perturbações. Esta instabilidade faz com que predomine um crescimento maior do primeiro vórtice formado em relação ao segundo- Assim, o primeiro vórtice irá se desprender para jusante com a corrente, e o segundo repetirá o fenómeno em menor proporção (Simoons, 2012). O número de *Strouhal*, *St*, relaciona a frequência desse fenómeno periódico, *f*, com a dimensão característica do corpo solido, *D*, e a velocidade do escoamento, *U*, sendo dado pela equação 2.3.

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

A relação entre o número de *Strouhal* e o número de *Reynolds* é dada graficamente pela figura 2.5.

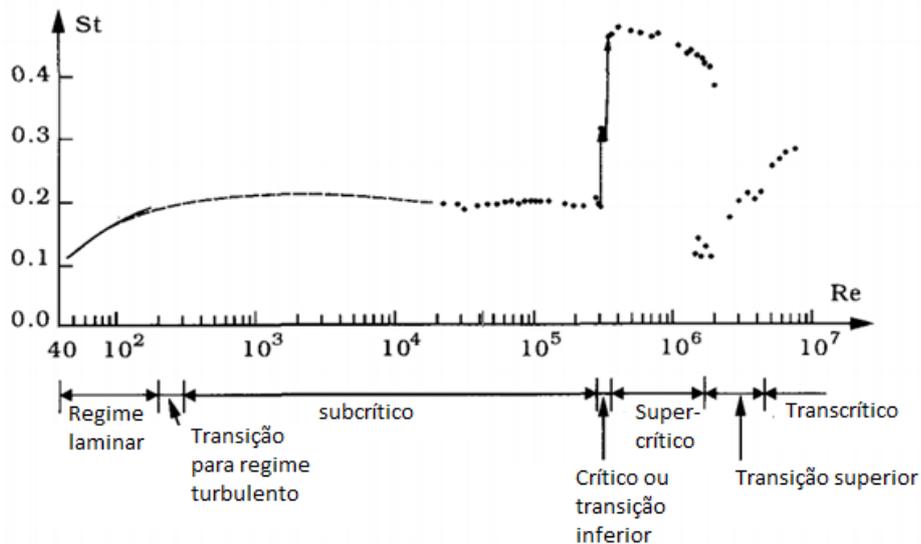


Figura 2.5 - Relação entre o número de *Strouhal* e o número de *Reynolds* (Sumer & Fredsoe, 1997)

Efetuada uma análise à figura 2.6 é possível verificar como se processa o despreendimento dos vórtices. Assim da análise da figura 2.6a é possível verificar que quando a região de vorticidade

B se forma, esta é atraída pela camada de corte do seu lado oposto, fazendo com que esta atravesse o plano de simetria que separa as duas camadas de corte, não permitindo deste modo o fornecimento de vorticidade da região de sinal oposto A. Deste modo, esta desprende-se do cilindro dando origem à formação do vórtice A. Com esta separação, a camada limite formará uma nova região C com o mesmo sinal de vorticidade, descrevendo o mesmo movimento da região B como se pode verificar na figura 2.6b (Sumer & Fredsoe, 1997).

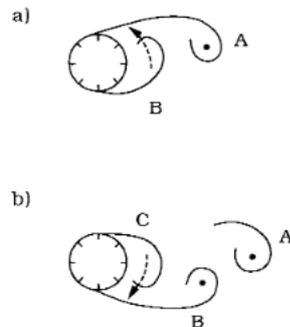


Figura 2.6 - Desprendimento de atração dos vórtices (Sumer & Fredsoe, 1997)

Dado o desprendimento dos vórtices formados, os mesmos deslocam-se para jusante, alternando o sentido em horário e anti-horário, formando assim um padrão regular. Estes vórtices não se vão misturar com o escoamento exterior, sendo que a sua dissipação é dada apenas através da fricção interna (Prandtl & Tietjens, 1957).

Este fenómeno é importante no dimensionamento dos pilares, uma vez que é responsável por variações de pressão, levando ao surgimento de esforços dinâmicos que induzem oscilações. Deste modo, este fenómeno constitui um risco, uma vez que estes esforços dinâmicos podem provocar a falha da estrutura caso os mesmos atinjam a frequência de ressonância (Pinto, 2008).

### 2.1.2 Forças Hidrodinâmicas atuantes no pilar

O escoamento vai provocar uma força sobre o pilar, força essa designada por força hidrodinâmica. Esta pode ser decomposta em dois componentes o coeficiente de arrasto,  $C_D$ , e o coeficiente de sustentação,  $C_L$ . Estes coeficientes são diretamente proporcionais às forças de arrasto,  $F_D$ , e de sustentação,  $F_L$ , representadas na figura 2.7.

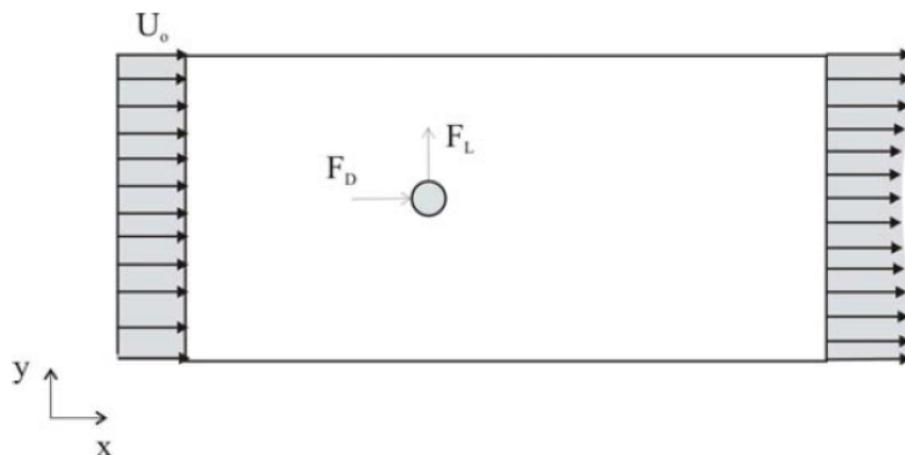


Figura 2.7 - Direção das componentes da força hidrodinâmica atuante no pilar (White, 2006)

O coeficiente de arrasto, segundo Pereira (2010), é um valor adimensional que quantifica a resistência de um objeto quando este sofre deslocamento. Este está relacionado com a força de arrasto,  $F_D$ , que é a força paralela à direção do escoamento. O coeficiente de arrasto pode ser obtido por:

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

sendo  $A_v$  a área de projeção vertical do pilar.

Quando nos encontramos na presença de escoamentos em regime laminar, o coeficiente de arrasto, vai decrescendo à medida que o  $Re$  aumenta. Para escoamentos com número de *Reynolds* entre 300 e  $3 \times 10^5$ , os valores de  $C_D$  não sofrem grandes variações, entrando numa queda brusca quando é atingido o regime crítico (White, 2006), conforme apresentado na figura 2.8. Estando na presença de um pilar cilíndrico e um escoamento com um número de *Reynolds* compreendido entre  $10^4$  e  $10^5$ , o valor do coeficiente de arrasto pode ser obtido relacionando o comprimento do cilindro com o seu diâmetro.

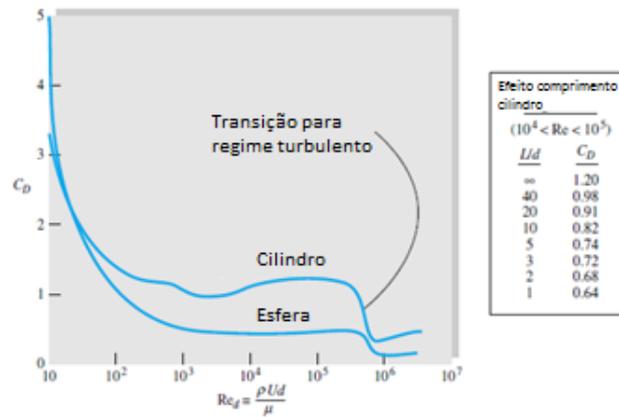


Figura 2.8 - Variação de  $C_D$  com o número de *Reynolds* (White, 2006)

O coeficiente de sustentação, por sua vez é também um coeficiente adimensional, relacionando a sustentação causada por um corpo, com a pressão dinâmica do escoamento e a área de projeção horizontal do pilar, sendo obtido pela seguinte expressão:

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

sendo  $A_h$  a área de projeção horizontal do pilar e  $F_L$  a força de sustentação.

Tal como o coeficiente de arrasto, o coeficiente de sustentação possui uma relação com o número de *Reynolds*. Deste modo para valores do número de *Reynolds* até  $3 \times 10^5$  o coeficiente de sustentação assume valor nulo. Quando atingido o regime crítico, o coeficiente chega a atingir valores superiores à unidade (Pinto, 2008). No caso de escoamentos simétricos, o coeficiente de sustentação é nulo (Sumer & Fredsoe, 1997). Esta caracterização é mostrada na figura 2.9.

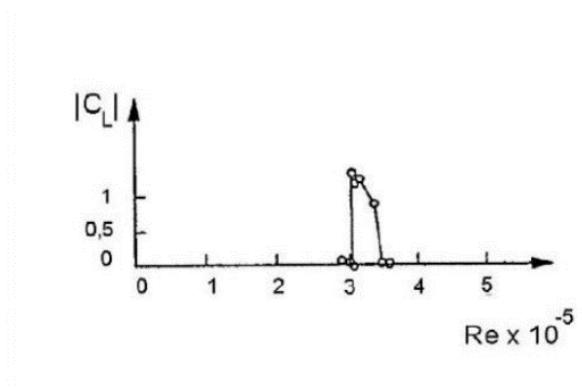


Figura 2.9 - Variação de  $C_L$  com  $Re$  (Sumer & Fredsoe, 1997)

Para além do coeficiente de arrasto e de sustentação, existe também o coeficiente de pressão, sendo um parâmetro adimensional que vai descrever as pressões ao longo do campo do escoamento. O coeficiente de pressão pode ser calculado para qualquer ponto do escoamento pela seguinte expressão:

$$C_p = \frac{p_\infty - p}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.6)$$

sendo  $p_\infty$  a pressão medida a montante e  $p$  a pressão medida a jusante.

### 2.1.3 Tensões no Fundo

O transporte de sedimentos, estando na presença de um escoamento uniforme pode ser caracterizado pelo parâmetro de *Shields*. Assim efetuando uma análise do escoamento recorrendo ao Diagrama de *Shields*, é possível efetuar uma previsão se irá ocorrer, ou não, movimento de partículas. Conhecendo o diâmetro, a massa volúmica do material, a massa volúmica e viscosidade cinemática da água é possível prever o valor da tensão de arrastamento crítica,  $\tau_c$  (Quintela, 2000).

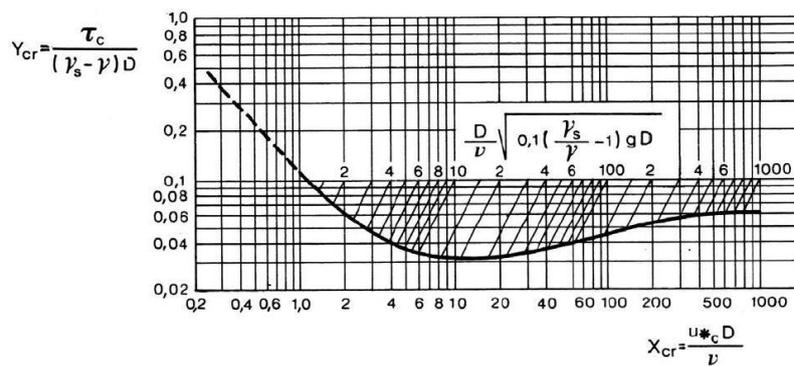


Figura 2.10 - Diagrama de *Shields* (Quintela, 2000)

O diagrama relaciona assim dois parâmetros adimensionais,  $X_{cr}$  e  $Y_{cr}$ . O parâmetro  $X_{cr}$ , representa o numero de *Reynolds* das partículas, sendo definido pela velocidade de atrito junto ao fundo,  $u_{*c}$ , e obtido por:

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

O segundo parâmetro  $Y_{cr}$ , designado de parâmetro de *Shields*, relaciona a tensão entre os sedimentos e o escoamento, sendo obtido por:

$$Y_{cr} = \frac{\tau_c}{(\rho_0 - \rho) \times g \times d} \quad (2.8)$$

Se o par de valores, para as condições do escoamento a estudar, se encontrar na zona do gráfico acima da curva, o escoamento ocorre com transporte sólido generalizado. No caso de o par de valores se situar na zona do gráfico abaixo da curva, o escoamento decorre sem transporte sólido proveniente de montante (Quintela, 2000).

## **2.2 Trabalhos Realizados sobre Modelação Numérica de Dinâmica de Fluidos e transporte de sedimentos**

Vários são os trabalhos realizados, quer a nível internacional (e.g. Roulund et al. (2005), Zhao et al. (2010) e Simoons (2012)) como já começam a aparecer alguns trabalhos desenvolvidos a nível nacional sobre a mesma temática (e.g. Ajú (2014) e Ramos (2012)), onde foi efetuado um estudo de modelação numérica de escoamentos e transporte de sedimentos.

Roulund et al. (2005) efetuaram um estudo aplicando um modelo 3D, sendo acoplado um modelo  $k-\omega$  de turbulência, resolvendo um conjunto de equações denominadas por RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*. O *software* escolhido para o mesmo foi o *EllipSys3D*, desenvolvido pelo *Risø National Laboratory*, Dinamarca e a *Technical University of Denmark*. A cavidade de equilíbrio predita pelo *software*, foi razoavelmente comparada com os dados laboratoriais obtidos, apresentando valores inferiores em cerca de 15% e 30% para montante e jusante do pilar, respectivamente, valores esses justificáveis pelo facto do transporte em suspensão não ser considerado pelo modelo.

Zhao et al. (2010) efetuaram também um estudo 3D recorrendo a elementos finitos. A simulação de um período de 3 horas de escoamento contou com a resolução das equações RANS, recorrendo ao modelo de turbulência  $k-\omega$ , acoplado concomitantemente um modelo de forma para simular as variações no leito do canal. Os resultados numéricos obtidos foram validados, com dados obtidos em ensaios laboratoriais. A cavidade formada predita pelo mesmo, verificou-se ser cerca de 10 a 20% mais pequena que a verificada nos ensaios laboratoriais, sendo que os resultados obtidos podem ser observados na figura 2.11. Concluíram que a cavidade de erosão é formada pela combinação dos vórtices ferradura e pelos vórtices de esteira.

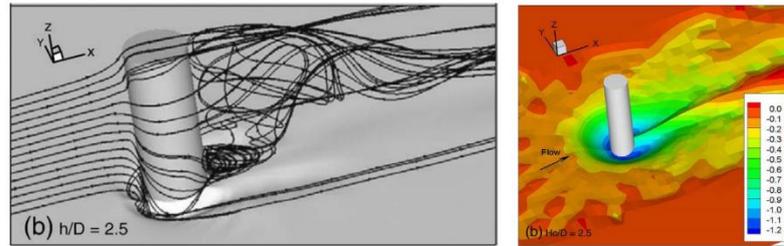


Figura 2.11 - Resultados de *Zhao et al. (2010)*. Esquerda: Linhas de corrente em volta do pilar. Direita: Leito após 3 horas

Simoons (2012), por sua vez, primeiramente efetuou um estudo prévio comparando um modelo 2D, com o modelo 3D, de forma a efetuar uma escolha da melhor forma de simular a cavidade formada numa eólica no mar. A análise foi efetuada recorrendo ao *software Delft3D* com modelação bidimensional. Este trabalho tem a particularidade de, ao contrário dos outros, ser simulado à escala real. Quanto aos resultados obtidos pelo mesmo voltam a ser razoáveis face ao verificado na situação real como pode ser consultado na figura 2.12.

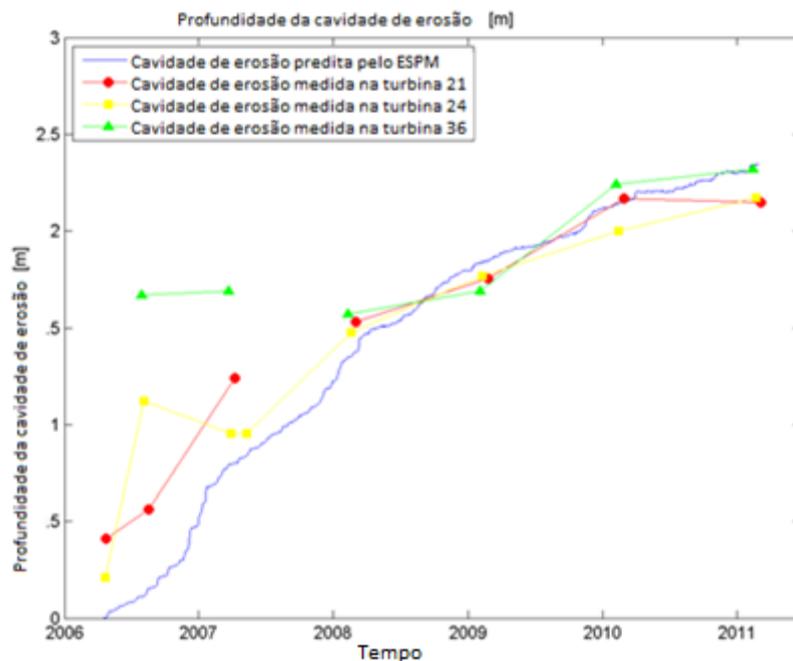


Figura 2.12 - Exemplo de resultados obtidos por *Simoons(2012)*

Quanto aos trabalhos desenvolvidos a nível nacional, tanto Ramos (2012) como Ajú (2014), foram desenvolvidos recorrendo ao *software Fluent*, focando-se mais em avaliar os resultados obtidos a nível hidrodinamico não efectuando um estudo numerico a nível da cavidade de erosão.

Ajú (2014) efectou o estudo avaliando a importancia da qualidade da malha, bem como de dois submodelos para o calculo da turbulencia, mais concretamente os modelos  $k-\varepsilon$  – *Standard* e  $k-\varepsilon$  – *RNG*.

Ramos (2012) efectou um estudo avaliando dois modelos distintos, sendo os mesmos o modelo *Large Eddy Simulation* – LES e o  $k-\omega$ , bem como efetuou uma analise ao escoamento sob um leito fixo e após a cavidade formada estar em equilibrio, como se pode verificar na figura 2.13. Os resultados obtidos foram verificados, por ensaios laboratoriais, efetuados pelo mesmo, e levaram-no a concluir que o modelo LES é superior ao  $k-\omega$  nas condições simuladas, sendo que a diferença entre os valores obtidos experimentalmente e numericamente para a força no pilar não chega a 2% para o modelo LES, apesar de o mesmo apresentar um processamento mais pesado para os computadores, o que se pode tornar um aspeto desfavorável para a utilização do mesmo. Na tabela 2.2 apresenta-se um pequeno resumo do trabalho de Ramos (2012) que permite identificar a configuração do canal usada e o modelo de cálculo, assim como o tempo de cálculo de cada simulação, a tensão de arrastamento máxima, bem como a força exercida no pilar. Assim é possível observar na tabela 2.2, que a mesma configuração simulada pelo modelo LES demora aproximadamente 30 horas a mais que o modelo  $k-\omega$ , o que se pode tornar num contra à utilização do mesmo. Assim nas primeiras duas simulações foi utilizada a configuração A, que representa o canal com o leito fixo onde apenas aplicou modelos diferentes para a simulação numérica, e comparou os resultados obtidos com dados experimentais, onde verificou que o modelo LES apresentou maior tempo de cálculo mas resultados mais precisos. Na simulação 3 e 4 aplicou os mesmos modelos mas agora considerando que a cavidade formada já se encontra em equilibrio, onde mais uma vez o modelo LES se apresentou como o mais preciso.

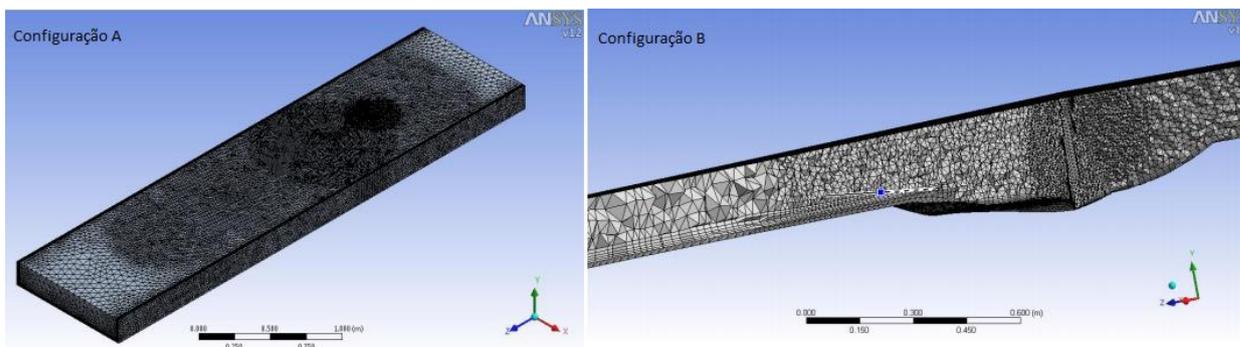


Figura 2.13 - Configurações usadas por Ramos (2012)

Tabela 2.2 - Tabela resumo dos resultados de Ramos (2012)

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



### 3 Modelação Numérica de Dinâmica de Fluidos

A modelação numérica da dinâmica de fluidos (designada como *Computational Fluid Dynamics*, *CFD*, na literatura inglesa) integra a simulação numérica dos fenómenos que ocorrem num determinado escoamento, tendo por base, as equações de fluidos em movimento.

A abordagem recorrendo ao *CFD* teve a sua primeira aparição na década de 50, sendo aplicada na área da aeronáutica. A sua utilização visava a obtenção de soluções de problemas complexos, problemas esses em que a sua resolução, sem auxílio de programas computacionais, seria extremamente difícil, dado o elevado número de variáveis usadas para traduzir os diferentes fenómenos em estudo (Anderson, 1995).

Hoje em dia, o *CFD* possui uma grande versatilidade de aplicações, que aliada ao aparecimento de computadores pessoais com elevado poder computacional, mostra-se capaz de dar resposta às exigências de processamento e de armazenamento de dados em problemas variados. Permite deste modo obter soluções em várias áreas de investigação desde a Geofísica à Engenharia Civil.

Para dar resposta a vários tipos de problemas os investigadores têm à sua disposição três ferramentas distintas:

- Métodos analíticos;
- Métodos numéricos;
- Métodos experimentais.

A abordagem *CFD* no estudo de problemas de mecânica dos fluídos apresenta como principal vantagem a diminuição no tempo e nos custos para a obtenção de soluções quando comparados com os métodos tradicionais. Os modelos numéricos dos sistemas físicos são precisos devido à utilização de formulações matemáticas bastante avançadas e à constante evolução tecnológica na área do cálculo computacional a qual permite a obtenção de soluções detalhadas, mesmo quando se faz uso de computadores pessoais com menor capacidade de processamento (Aranda, 2010).

Apesar das vantagens apresentadas, a validação do método numérico é sempre necessária, utilizando para isso resultados obtidos através da resolução de métodos analíticos ou métodos

experimentais, de modo a ser possível efetuar uma comparação entre os diferentes resultados obtidos e calibrar e validar o modelo.

Assim, a simulação numérica do escoamento de fluidos pressupõe deste modo uma compreensão dos fenómenos físicos do sistema em estudo, compreensão essa que será utilizada na estruturação do problema, possibilitando definir corretamente as condições-fronteira e todas as condicionantes do problema, bem como eventuais esquemas numéricos a desenvolver.

Segundo Ferziger e Peric (2002), uma simulação CFD deve ser construída tendo em conta as seguintes propriedades:

- Consistência;
- Estabilidade;
- Convergência
- Precisão;
- Conservação.

A nível da consistência, a solução irá ser mais precisa quanto menor for a dimensão dos elementos da malha. A diferença entre o valor obtido pela equação discretizada e o valor real é chamada de erro de truncatura. A estabilidade do modelo construído é essencial, de modo a que os métodos utilizados não levem a um aumento dos erros no decorrer do cálculo. A solução deve convergir para um valor próximo do real.

A precisão da solução obtida pela simulação irá depender dos erros cometidos na modelação do problema, da convergência, entre outros, sendo que o processo de cálculo utilizado pelo mesmo deve obedecer às leis de conservação.

Assim o CFD tem como princípio básico, dividir o escoamento em pequenos elementos, formando uma malha computacional, sendo aplicada a cada elemento da malha as equações que resultam dos princípios que regem a dinâmica de fluidos (Aranda, 2010).

Apesar de todas as vantagens associadas à abordagem CFD para a obtenção de uma solução, segundo Roulound et al. (2005) e Zhao et al. (2010), o número de estudos efetuados em 3D, ainda não são muito elevados. Esta situação poderá dever-se, a limitações no desempenho computacional (Zhao et al., 2010), assim como às limitações do uso de *softwares* devido ao seu custo de aquisição e também à forma como estes são distribuídos.

### 3.1 Formulação matemática de escoamento de fluidos

#### 3.1.1 Conservação da Massa

A equação da continuidade traduz o princípio da conservação da massa, quando aplicada a um volume infinitesimal de fluido num escoamento, sendo representada pela seguinte equação (Azevedo, 2011):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0, \quad (3.1)$$

sendo  $U_i$  a componente da velocidade na direção  $i$ ,  $t$  o tempo e  $x_i$  a posição da partícula na direção  $i$ .

No caso de fluidos incompressíveis, uma vez que a sua massa volúmica é constante ao longo do tempo, é possível aplicar-se  $\partial \rho / \partial t = 0$  na expressão 3.1, sendo representada nesta situação na forma cartesiana pela seguinte expressão (Azevedo, 2011):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

#### 3.1.2 Conservação da Quantidade de Movimento

A equação de conservação da Quantidade de Movimento, segunda Lei de Newton, aplicada a um elemento de fluido na sua forma diferencial, relaciona o conjunto de forças externas com a variação da quantidade de movimento. Ao substituir o tensor das tensões viscosas pela relação entre a tensão e a taxa de deformação para fluidos Newtonianos e isotrópicos, obtém-se a equação de *Navier-Stokes* (Azevedo, 2011):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j}), \quad (3.3)$$

em que  $\mu$  é a viscosidade do fluido, sendo aplicável a todos os escoamentos não permanentes, de fluidos newtonianos. Assim é possível representar o balanço entre o produto da massa pela correspondente aceleração, ou seja, a taxa de variação da quantidade de movimento, bem como o conjunto de forças a que essa massa se encontra sujeita e as variações de tensões tangenciais provocadas pelas flutuações turbulentas da velocidade  $(-\overline{\rho u'_i u'_j})$  a que a massa fica sujeita. Sendo o número de incógnitas superior ao número de equações, torna-se então necessário

recorrer a expressões empíricas de forma a relacionar as novas incógnitas, designadas por “tensões” de *Reynolds*, com variáveis do escoamento médio. Relações estas conhecidas por modelos de turbulência (Azevedo, 2011).

De um modo geral, a equação 3.3 representa um sistema de equações determinado, uma vez que existe uma equação por cada incógnita. Dado que a resolução das equações de *Navier-Stokes* é complexa, a obtenção de uma solução analítica é possível apenas para casos simplificados mediante a adoção de hipóteses simplificadoras. Assim, a sua resolução é obtida por métodos computacionais, exigindo capacidades elevadas de armazenamento e de velocidade de cálculo (Pinto, 2008).

### **3.2 Escoamentos Turbulentos**

Nos escoamentos turbulentos, as partículas apresentam um movimento caótico macroscópico, ou seja, a velocidade apresenta componentes transversais ao sentido do escoamento principal. Este tipo de escoamento apresenta tipicamente as seguintes características (Tennekes & Lumley, 1972):

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

Assim, os escoamentos turbulentos podem ser caracterizados por serem instáveis, apresentando flutuações da velocidade no tempo e no espaço, sendo o tipo de escoamento de fluido mais complexo (Tennekes & Lumley, 1972).

#### **3.2.1 Variáveis Características da Turbulência**

Com a introdução de equações de transporte adicionais utilizando os modelos de turbulência, é necessário o uso de valores característico da turbulência. Estes valores característicos são os seguintes (Ramos, 2012):

- Intensidade da turbulência;
- Comprimento característico de turbulência;
- Energia cinética turbulenta;

- Viscosidade cinemática turbulenta;
- Taxa de dissipação turbulenta;
- Taxa de dissipação específica;

Os parâmetros característicos podem ser calculados recorrendo a formulações matemáticas, formulações essas que foram abordadas por Azevedo (2011). Nesse documento são apresentadas as formulações utilizadas para caracterizar a turbulência, bem como uma breve descrição de cada variável.

### 3.3 Modelos de Resolução Numérica

Tem-se verificado um aumento do poder computacional, e que este aumento tem chegado mais facilmente ao utilizador comum. Este fator levou a que os métodos numéricos passassem a ser mais utilizados na Engenharia.

Deste modo, para a resolução numérica das equações de *Navier-Stokes* existem vários modelos. A escolha do modelo a empregar na resolução do problema é muito importante, de modo a ser possível uma representação mais fiel da situação observada, obtendo assim, uma solução de melhor qualidade. Os vários modelos disponíveis encontram-se divididos em três grandes grupos (Wendt, 2009):

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

#### 3.3.1 Modelos baseados nas Equações Medias de *Reynolds*, RANS

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por flutuações da velocidade, no espaço e tempo. Os mesmos podem ser resolvidos aplicando diretamente as equações de *Navier-Stokes*, que apesar de obter informação com qualidade, podem tornar o processo demorado e dispendioso. Assim as equações foram simplificadas surgindo um grupo de equações denominadas por RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*, permitindo deste modo modelar uma escala de turbulência mais abrangente (Wendt, 2009).

Conservação da massa: 
$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (3.1)$$

Quantidade de movimento: 
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} (-\rho \overline{u_i^2 u_j^2}) \quad (3.3)$$

Nos modelos RANS, o elemento crítico é representado pela tensão de *Reynolds* que descreve o efeito da flutuação turbulenta da velocidade e da pressão. Esta tensão pode ser obtida por diferentes formas, a partir das classes de modelos: modelo standard k-ε, modelo k-ω e Modelo Shear Stress Transport k- ω.

### 3.3.1.1 Modelo Standard k-ε

Modelo proposto inicialmente por *Brian Launder e Dudley Spalding*, em 1972 (Launder e Spalding, 1974), é no meio dos modelos de turbulência, um dos mais simples e popular. Este é um modelo semi-empírico, baseado nas equações do transporte para a energia cinética de turbulência e da taxa de dissipação. Com a resolução destas equações, consegue-se representar as propriedades turbulentas do escoamento e determinar assim a viscosidade turbulenta. Este é composto por três submodelos:

- *Standard*
- *RNG (Renormalization)*
- *Realizable*

Largamente utilizado e muito robusto, o submodelo *Standard* apresenta limitações na simulação de escoamentos complexos, nomeadamente com elevados gradientes de pressão, curvaturas acentuadas, entre outros.

Por sua vez o submodelo *RNG* é o indicado na presença de escoamentos sujeitos a tensões de corte, vórtices e escoamento local de transição.

O submodelo *Realizable* apresenta as mesmas vantagens e potencialidades do submodelo *RNG*, mas tem como vantagem convergir mais rapidamente.

Assim este modelo apenas se apresenta como solução para escoamentos completamente turbulentos, onde os efeitos moleculares podem ser minimizados, face ao movimento turbulento (Launder e Spalding, 1974). Apesar de apresentar um bom rendimento em termos de aproximação e constituição, este modelo não é o mais adequado quando estamos na presença de escoamentos com separação da camada limite, com mudanças súbitas nas taxas de estrangulamento, em fluidos rotativos ou em superfícies curvas (Abrunhosa, 2003).

É importante salientar que apesar de não ser a mais adequada, este foi a formulação usada quando se efetuou as simulações em 3D no *software Delft3D*.

### 3.3.1.2 Modelo $k-\omega$

O modelo  $k-\omega$  teve por base o modelo proposto por *Kolmogorov* em 1942 (Kolmogorov, 1942), que incluía duas equações diferenciais, uma para o  $k$  e uma segunda para o  $\omega$ , sendo esta definida como a dissipação de energia por unidade de volume e tempo. Os modelos atuais para a formulação  $k-\omega$ , têm por base a formulação feita por *Saffman* (Saffman, 1970), proposta em 1970, tendo este modelo vindo a sofrer alguns ajustamentos e melhorias. O parâmetro  $\omega$  pode ser considerado como uma frequência característica do processo de decaimento da turbulência.

Em 1988, *Saffman* e *Wilcox* (Saffman e Wilcox, 1974), apresentam uma nova versão onde se substitui a taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta por  $\omega = \varepsilon/k$ , em que a viscosidade turbulenta se supõe que esteja associada à energia cinética turbulenta,  $k$ , e à taxa de dissipação específica,  $\omega$ , pela seguinte relação (Menter, 1992):

$$u_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.12)$$

Este modelo é caracterizado por baixos números de *Reynolds* e por apresentar capacidade de efetuar o tratamento junto à fronteira do obstáculo. Por outro lado, apresenta alguma dificuldade em simular as condições distantes da parede do obstáculo (Ferziger e Peric, 2002).

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

Desenvolvido por *Menter*, em 1994 (Menter, 1992), este modelo não representa por si um novo modelo de turbulência, mas aproveita as potencialidades dos outros dois, o  $k-\omega$  e o  $k-\varepsilon$ . Considera o modelo  $k-\omega$  para o tratamento junto da fronteira do obstáculo e o  $k-\varepsilon$  para as restantes regiões, o que envolve dois conjuntos de equações de transporte (Blasek, 2001).

Assim este modelo consegue prever com uma boa aproximação o começo e o tamanho de separação de escoamento sob gradientes de pressão em condições adversas, a partir da inclusão de efeitos de transporte na formulação do modelo de viscosidade turbulenta (Abrunhosa, 2003).

### 3.3.2 Método da Simulação das Grandes Escalas da Turbulência, LES

Os modelos LES partem do princípio de que os movimentos nas menores escalas tendem a ser mais homogêneos e isotrópicos, daí serem menos afetados pelas condições de contorno.

Na engenharia, as primeiras aplicações baseadas neste método foram conduzidas por *Deardoff*, em 1970 (Bortoli, 2000). Tendo sofrido nos últimos anos um grande aumento de popularidade, firmando-se como uma técnica fidedigna para a previsão de escoamentos turbulentos, através do desenvolvimento da classe dos modelos dinâmicos de tensões residuais (Anderson, 1995).

Este modelo, segundo Keylock et al. (2012), apresenta um método de resolução computacional mais preciso do que os modelos RANS. Apresenta como vantagem a resolução dinâmica de grandes vórtices, permitindo de igual forma determinar o transporte de sedimentos.

Comparativamente aos modelos construídos com base na simulação numérica direta, este apresenta-se capaz de ser aplicado a números de *Reynolds* elevados, uma vez que resolve as equações de *Navier-Stokes* para as escalas maiores (Piomelli, 2004). Apresenta também um nível de recurso computacional menor, pois não tem necessidade de resolver os vórtices mais pequenos no campo de escoamento (Anderson, 1995).

Este modelo apresenta como desvantagem, a necessidade de uma malha mais fina e de grande resolução nas proximidades de obstáculos. As tensões de corte de *Reynolds* são determinadas pelas grandes escalas turbulentas. As simulações necessitam ser conduzidas de modo a que o maior contributo para as tensões de corte seja dos vórtices resolvidos, levando a que o filtro não deverá ser mais largo que uma pequena fração fina da escala turbilhonar integral local. À medida que a parede se aproxima, a escala integral diminui e, com ela, a largura do filtro (Bortoli, 2000).

### 3.3.3 Simulação Numérica Direta, DNS

De todos os métodos apresentados, o *DNS* é o modelo mais natural para resolver o escoamento turbulento pois fundamenta-se na resolução das equações de *Navier-Stokes* sem recorrer a médias ou outras aproximações que não sejam resultantes da discretização numérica, portanto

o erro pode ser estimado e controlado, não recorrendo assim a qualquer modelo de turbulência. Esta situação implica a necessidade de resolver toda a gama de escalas temporais e espaciais do modelo (Azevedo, 2011) resultando num maior esforço computacional e muito mais dispendioso (Piomelli, 2004).

Uma *DNS*, deve assegurar que todas as estruturas da turbulência sejam captadas. Assim o domínio computacional deve ser maior que o maior vórtice. Para uma simulação ser válida esta deve ser capaz de resolver toda a dissipação de energia cinética.

Como os escoamentos turbulentos apresentam um largo espectro de energia, simular todas as escalas que o caracterizam torna-se difícil. Deste modo a *DNS* apenas é aplicável em situações onde o número de *Reynolds* seja moderado, situação que não acontece na maioria dos escoamentos (Martinez, 2006).

### **3.4 Métodos para Discretização Espacial**

Um método numérico é um modelo matemático desenvolvido para se obter soluções de um conjunto de equações. Não existe no entanto um modelo aplicável a todos os casos existentes. Portanto, é então necessário selecionar o modelo matemático que melhor se aplique à situação em estudo, bem como selecionar um método de discretização espacial apropriado para modo a aproximar as equações governativas por um sistema de equações algébricas, de maneira a obter as variáveis do problema em localizações discretas no espaço e no tempo (Gonçalves, 2007).

São vários os métodos numéricos de resolução das equações, entre os quais se pode destacar:

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

No entanto quando estamos na presença de uma malha suficientemente boa, para um dado problema, o resultado obtido por qualquer um dos métodos será o mesmo. Apesar disso existem métodos que se adequam mais a determinados tipos de problemas que outros (Gonçalves, 2007).

### 3.5 Malhas

A malha computacional serve como representação do modelo físico por meio de células ou elementos. Quanto maior resolução apresentar, menores vão ser os erros numéricos. No caso de escoamentos turbulentos, dado existir um maior número de equações, a imprecisão vai ser superior. Logo, a malha deve ser mais refinada, de modo a obter resultados mais precisos (Wendt, 2009).

Como se observa da análise da figura 3.1, as malhas podem ser agrupadas em 3 grupos diferentes: podem ser ortogonais estruturadas, não ortogonais estruturadas e não ortogonais não estruturadas.

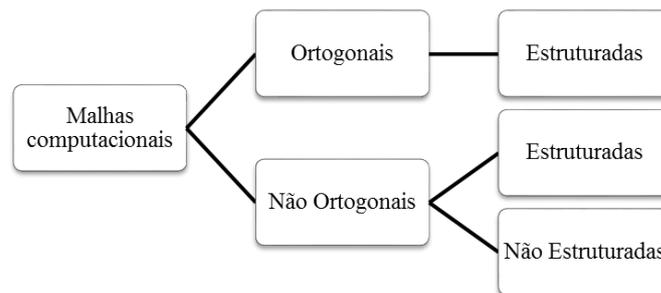


Figura 3.1 - Tipos de malhas (adaptado de Anderson (1995))

Uma malha não ortogonal (figura 3.3), comparativamente a uma malha ortogonal (figura 3.2), adapta-se melhor ao pilar, permitindo assim uma maior exatidão nos cálculos. Uma malha estruturada (figura 3.2) é caracterizada por cada volume interno ter o mesmo número de vizinhos e existir uma sequência natural dos mesmos (Bortoli, 2000). As malhas estruturadas apresentam como desvantagem o facto de apenas poderem ser aplicadas em domínios com geometrias de complexidade média. Há uma dificuldade na distribuição dos pontos da malha para a qual uma concentração de células numa região vai implicar necessariamente um menor espaçamento em outras regiões do domínio e o conseqüente desperdício de recursos. Esta situação tem um impacto maior em modelos tridimensionais (Gonçalves, 2007). A vantagem das malhas estruturadas é na alocação de recursos, devido à definição dos volumes da malha ser menor, por existir uma distribuição ordenada dos mesmos.

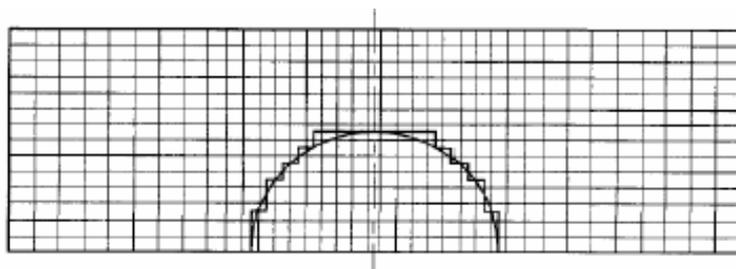


Figura 3.2 - Exemplo de malha ortogonal (Gonçalves, 2007)

As malhas não ortogonais, figura 3.3, têm sido desenvolvidas de forma a superar as desvantagens verificadas nas malhas ortogonais, sendo possível obter com estas uma maior precisão junto às fronteiras, traduzindo-se em resultados mais precisos.

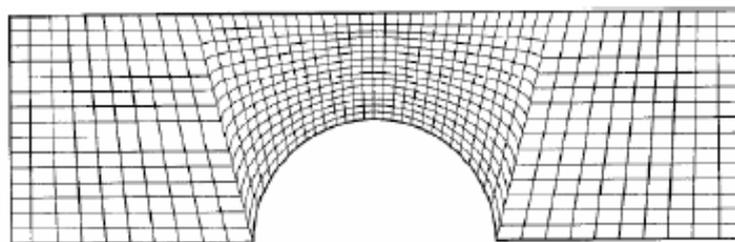


Figura 3.3 - Exemplo de malha não ortogonal (Gonçalves, 2007)

Na presença de geometrias mais complexas surgem as malhas não estruturadas (figura 3.4), como sendo mais adequadas, pois conseguem adaptar-se a qualquer tipo de solução sem restrições nas suas fronteiras. Têm uma grande aplicabilidade para os métodos dos volumes finitos e elementos finitos. Os elementos ou volumes de controlo podem possuir qualquer forma não havendo qualquer restrição ao número de elementos vizinhos ou vértices (Gonçalves, 2007).

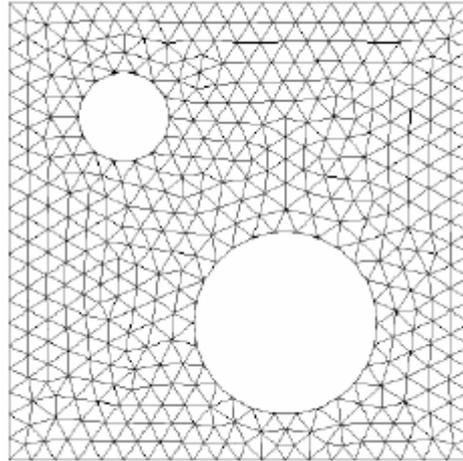


Figura 3.4 - Exemplo de malha não estruturada (Gonçalves, 2007).

Como desvantagem, uma vez que a sua estrutura vai ser muito irregular, a sua complexidade vai ser superior, levando assim a que os algoritmos que resolvem os sistemas de equações algébricas neste tipo de malha sejam mais demorados que os algoritmos para malhas estruturadas (Gonçalves, 2007).

## 4 Metodologia Utilizada para a Simulação do Caso de Estudo

### 4.1 Procedimento Geral e *Software* Utilizado

Devido às vantagens apresentadas por este tipo de simulações e ao considerável desenvolvimento computacional registado nos últimos anos, os estudos com base em modelação 2D e 3D têm sofrido uma crescente atenção.

O computador utilizado para a realização das simulações numéricas é dotado de um processador Intel Core I5 4590 com 3.7GHz de processamento, 8Gb de memória RAM e uma capacidade de armazenamento de 370Gb, sendo o *software* escolhido o Delft3D, versão 4.00.00. O Delft3D é um *software open source*, permitindo uma simulação ampla e avançada sendo utilizada para estudos hidráulicos. Na construção dos modelos para o mesmo, os procedimentos básicos passam por:

- Definição da geometria do problema em 2D;
- Geração da malha;
- Definição das condições de simulação;
- Definição das condições de fronteira;
- Realização do cálculo numérico.

Assim uma primeira fase passou por definir o problema através de um modelo geométrico. Numa segunda fase o domínio computacional foi dividido num número de elementos infinitesimais que constituem a malha. Seguidamente foram definidas as condições da simulação bem como as condições de fronteira, fase esta crucial na precisão do resultado obtido na simulação. Estes resultados também dependem do tipo de malha adotada, bem como do número de elementos pelo qual a malha é constituída. De notar que quanto mais refinada for a malha, mais precisos são os resultados. No entanto seria necessário um maior poder e tempo computacional, sendo extremamente importante chegar a um compromisso de forma a se obter um ponto de equilíbrio entre o tempo de cálculo e a qualidade da simulação.

Tendo por base o definido acima, o *software* correu um algoritmo numérico que modelou as variáveis do escoamento num sistema de equações analíticas simples. De seguida discretizou-se as equações fundamentais, substituindo-as pelas equações obtidas anteriormente, resolvendo assim o sistema de equações algébricas.

Na figura 4.1, é demonstrado o menu inicial do Delft3D. Este menu permite um acesso rápido e simples a todas as funcionalidades do mesmo.

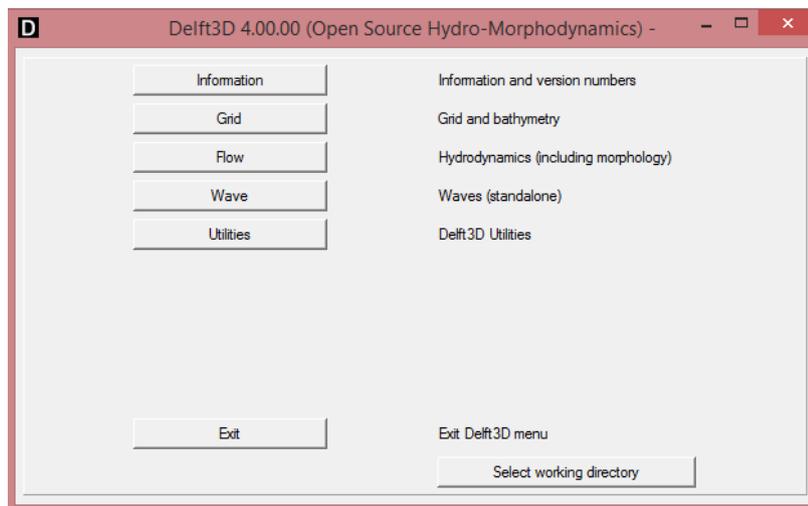


Figura 4.1 - Menu inicial do *software* Delft3D.

## 4.2 Metodologia para a implementação do modelo

### 4.2.1 Apresentação das simulações

Todas as simulações foram executadas para uma plataforma de 2,5 m de comprimento e 0,3 m de largura, correspondente ao canal hidráulico do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade do Minho mostrada na figura 4.2, com o objetivo de comparar os presentes resultados numéricos com os resultados experimentais relativos à erosão localizada de pilares de pontes obtidos neste canal (Leite, 2010).

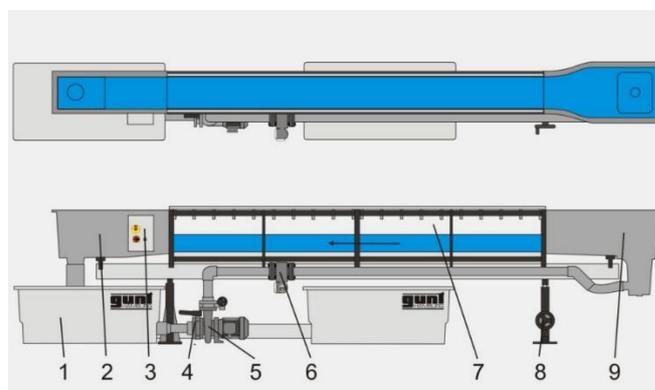


Figura 4.2 - Esquema do canal hidráulico (1-Reservatório; 2- Secção de jusante; 3-Painel de controlo; 4- Válvula; 5- bomba centrífuga; 6- Medidor de Caudal; 7-Secção de teste; 8- Ajuste da inclinação longitudinal; 9- Secção de montante) (retirado de Leite (2010)).

Os resultados relativos ao campo de velocidade serão comparados com os obtidos por Lima (2014), tendo sido medidos através de um sistema de Anemometria Laser *Doppler* de duas componentes, num canal idêntico mas mais largo (0,4 m) no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O estudo foi efetuado para uma profundidade de 5 cm e uma velocidade de escoamento de  $0,17 \text{ ms}^{-1}$ , sendo considerado que o fundo era fixo. Este fundo fixo consistia numa placa de vidro acrílico, na qual foi colada uma fina camada de grãos de areia de diâmetro médio,  $D_{50}$ , igual a 0,376 mm. Conferindo desta forma uma rugosidade artificial ao fundo semelhante à de um leito de sedimentos.

Pretende-se igualmente comparar as simulações comos resultados experimentais de Azevedo (2014), que efetuou um estudo da erosão localizada para quatro diferentes configurações de pilares. As duas primeira eram apenas de um pilar sem nenhuma ranhura, sendo um circular e o outro um pilar alongado, aos quais foram introduzidas uma ranhura central, para avaliar se a mesma iriar mitigar as alterações do escoamento. Neste trabalho foi avaliada a evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão, verificando-se que a profundidade máxima da cavidade de erosão evolui a um ritmo maior na fase inicial do processo erosivo e que a introdução das ranhuras nos pilares se mostra mais eficaz em pilares circulares.

A geometria selecionada para a simulação, ao ser idêntica à do modelo físico de menor dimensão transversal, permite a comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos. Ao longo das várias simulações foi alterada a configuração do pilar, bem como as condições do escoamento de forma a avaliar os impactos adicionados pelos mesmos. Duas das geometrias adotadas para as diferentes simulações (figura 4.3) permitem a comparação com os resultados de Leite (2011) (caso a), Leite (2014) (caso b)), sendo o caso c) uma configuração alternativa sugerida no âmbito do presente trabalho. As ranhuras eram praticadas a toda a altura do pilar, podendo o pilar da configuração b) ser interpretado como dois meios pilares afastados de 0.0025 m (ranhura de 2.5 mm).

As condições do escoamento adotadas para cada uma das simulações podem ser consultadas na tabela 4.1. A simulação 1 permite a validação dos resultados numéricos comparando com os resultados de Lima (2014), razão pela qual foi efetuada em 3D. As simulações 2 a 3 possibilitam a comparação com os resultados de Leite (2010) e Leite (2014) razão pela qual os valores estabelecidos para a velocidade média e a altura do escoamento são distintos da simulação 1. A simulação 4 permite analisar o efeito da alteração da geometria do pilar. As simulações 2, 3 e 4 foram efetuadas em 2D pois, segundo Simoons (2012), os resultados obtidos pelo *software* a

2D e 3D são semelhantes e os modelos 3D, além de serem mais pesados, apresentam maior sensibilidade quanto ao input de alguns dados.

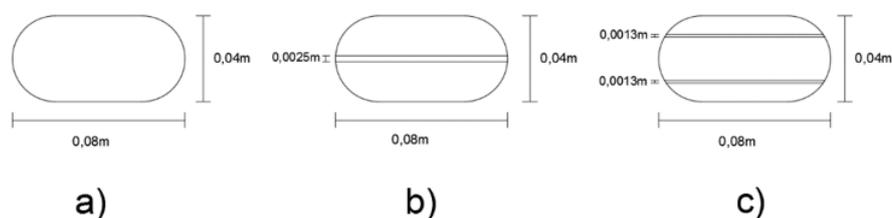


Figura 4.3 - Diferentes configurações adotadas para o pilar (pilar alongado de extremidades semicirculares (a), pilar alongado de extremidades semicirculares com ranhura (b), pilar alongado de extremidades semicirculares com duas ranhuras (c))

Tabela 4.1 - Apresentação sucinta dos casos de estudo

Simulação	Configuração do pilar	Velocidade média do escoamento (m/s)	Altura de escoamento (cm)	Dimensão média ( $D_{50}$ ) dos sedimentos (mm)	Tipo de simulação
1	a)	0,17	5	0,376	3D
2	a)	0,3	15	0,376	2D
3	b)	0,3	15	0,376	2D
4	c)	0,3	15	0,376	2D

#### 4.2.2 Definição da geometria do problema

No Delft3D a geometria do problema é realizada em 2D, a partir do submenu mostrado na figura 4.4, utilizando *splines*. Estas *splines* podem ser tanto desenhadas no próprio *software*, como importados de outros *softwares*, desde que convertidos para o devido formato. Assim na elaboração desta dissertação optou-se por representar a geometria recorrendo para isso ao *software AutoCad*, sendo a geometria seguidamente importada para o *software*.

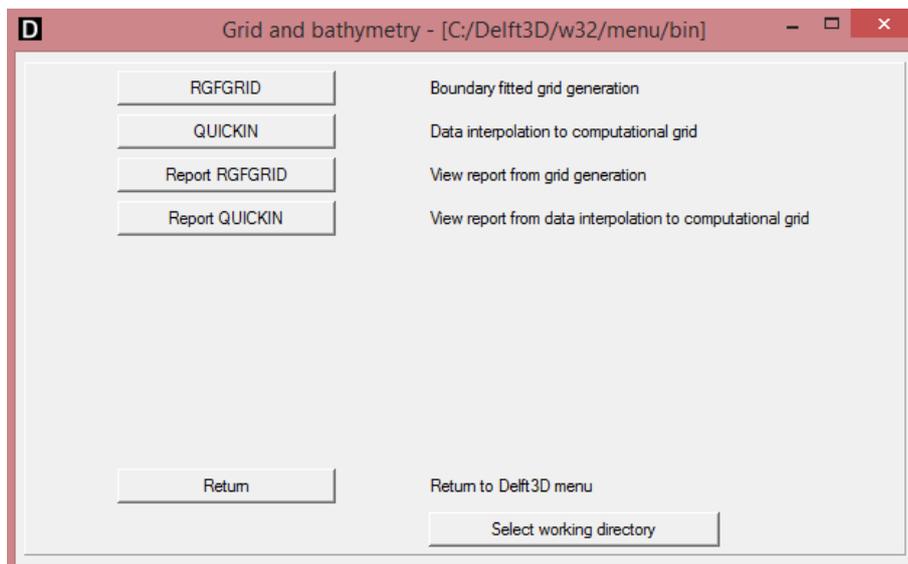


Figura 4.4 - Sub-menu para criação da geometria e malha

O canal em estudo possuía 0,3 m de largura e 14 m de comprimento (Leite, 2010), no entanto no *software* de forma a tornar o modelo mais leve apenas foi simulada a plataforma onde se encontrariam os sedimentos e o pilar apresentando assim os mesmos 0,3 m de largura mas apenas 2,5 m de comprimento. O pilar estava situado no meio da plataforma.

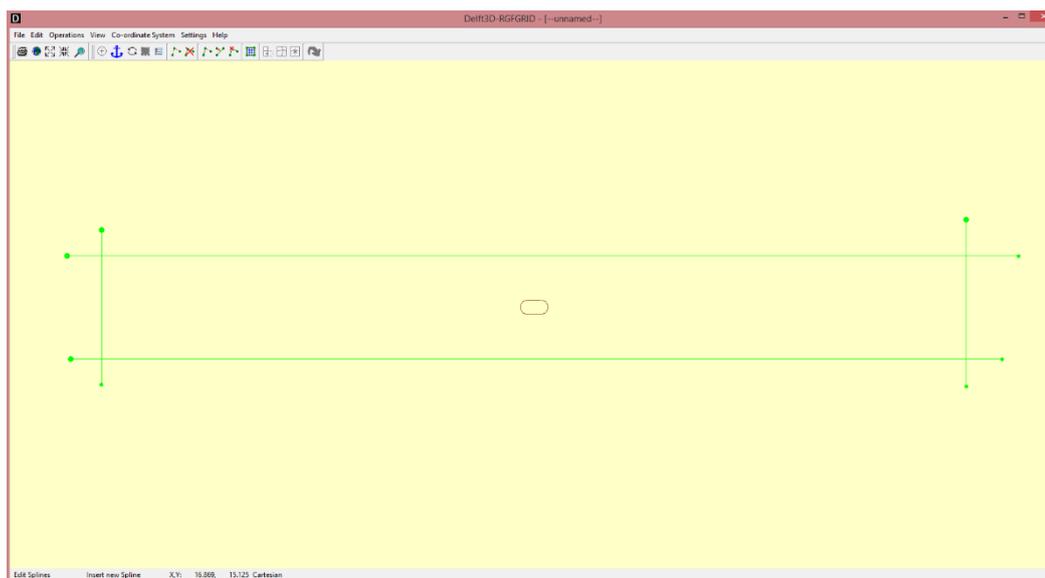


Figura 4.5 - Geometria a utilizar na simulação

Na figura 4.5 é apresentada a geometria utilizada nas simulações, estando representado a plataforma onde se encontravam os sedimentos. O contorno a verde corresponde às *splines* utilizadas para a construção da malha. Mais uma vez, é importante referir que no desenvolvimento desta dissertação apenas se optou por simular o troço com 2,5 m do canal,

uma vez que os resultados que se pretendia usar para validar o modelo, foram obtidos construindo uma plataforma com as mesmas dimensões e mesma configuração onde seriam depositados os sedimentos e o pilar.

#### 4.2.3 Geração da malha

As malhas computacionais podem ser criadas através de várias ferramentas. No entanto, no desenvolvimento desta dissertação optou-se por utilizar a ferramenta disponibilizada pelo próprio *software* que cria uma malha ortogonal. Na figura 4.6 representa-se a malha base obtida para o problema em estudo. A malha apresentada é composta por 8688 células, apresentando uma maior resolução na zona próxima do pilar, assim na zona de menor refinamento as mesmas apresentam  $0,010 \times 0,017$  m e nas zonas de maior refinamento  $0,005 \times 0,008$  m.

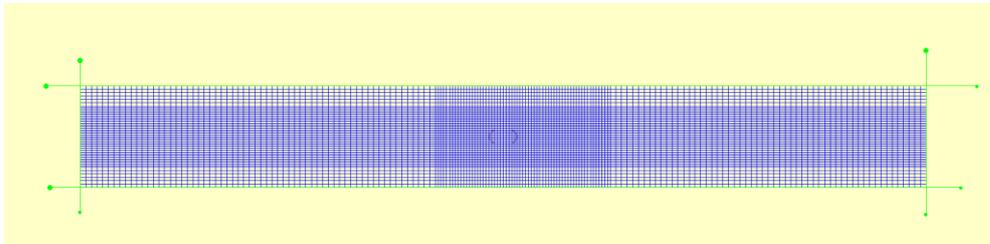


Figura 4.6 - Malha obtida a utilizar na simulação.

Na figura 4.7 é possível observar o pormenor na grelha na zona do pilar.

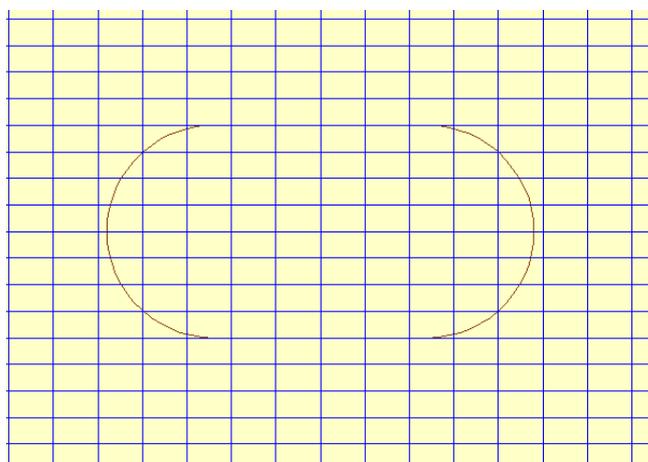


Figura 4.7 - Pormenor da malha na zona do pilar

Com a introdução das ranhuras foi necessário criar uma segunda malha, tendo por base a primeira grelha, efetuando um refinamento na zona das ranhuras de modo às mesmas ficarem melhor representadas (figura 4.8).

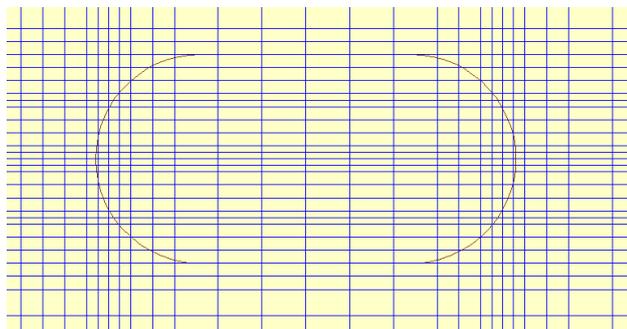


Figura 4.8 - Pormenor da malha na zona do pilar

Para se simular o pilar optou-se pela utilização de pontos secos, ou seja, nestes pontos o fluido nunca irá circular fazendo desta forma o efeito do pilar, conforme mostrado na figura 4.9. O mesmo poderia também ser simulado apagando os pontos da malha. Após um teste efetuado, chegou-se à conclusão que os resultados obtidos por ambas as abordagens eram os mesmos, sendo que pela metodologia dos pontos secos o tempo de simulação era ligeiramente inferior, razão pela qual se optou por esta solução.

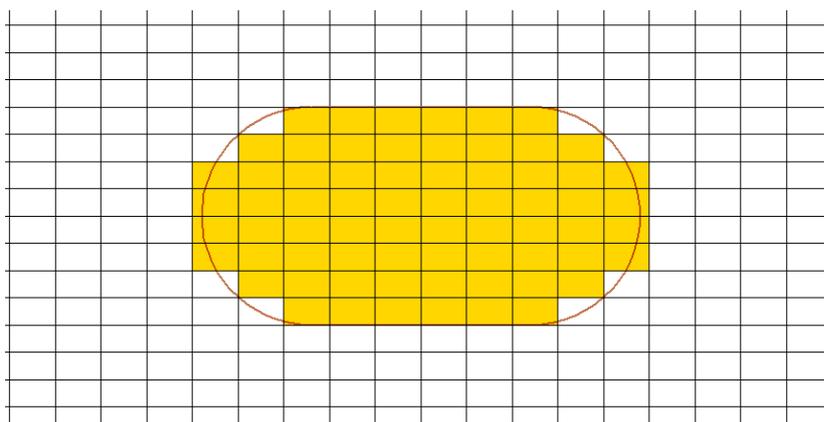


Figura 4.9 - Pormenor da seleção dos pontos secos

Como se pode constatar da análise da figura 4.9, como se trata de uma malha ortogonal não foi possível obter uma maior precisão na zona circular do pilar, incorrendo-se deste modo em alguns erros.

#### 4.2.4 Definição Hidrodinâmica do problema

Na definição hidrodinâmica do problema é onde são efetuadas todas as decisões acerca das simulações, desde períodos de simulações a condições de fronteira do problema, passando pela inclusão dos pontos secos, ondas, sedimentos, vento entre outros. A interface do Delft3D, que trata desta abordagem é apresentada na figura 4.10.

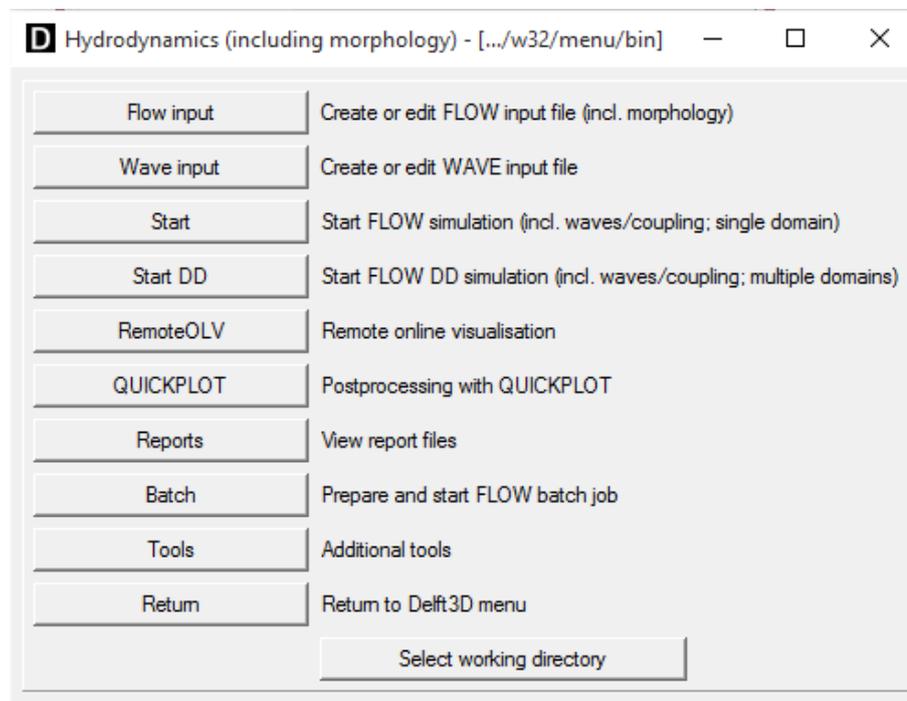


Figura 4.10 – Submenu para a definição hidrodinâmica do problema

O problema é definido no *Flow input*, onde na primeira fase pede uma descrição do caso a criar, conforme a figura 4.11.

Seguidamente é necessário definir o domínio no problema, através do submenu *Domain* (Figura 4.12). Neste menu será carregada a malha criada anteriormente, bem como é necessário definir a batimetria e definir os pontos secos que irão caracterizar o pilar.

No problema foi considerada a latitude de 41°, uma vez esta ser a latitude da cidade de Guimarães, onde se encontrava o canal onde foram realizados os ensaios que se pretendem simular.

A batimetria do terreno foi definida no submenu *Bathymetry* (figura 4.13) onde se poderia definir uma batimetria uniforme ou carregar um ficheiro com os dados da batimetria. Uma vez que o canal se encontrava nhorizontal, e os sedimentos dispostos uniformemente optou-se por

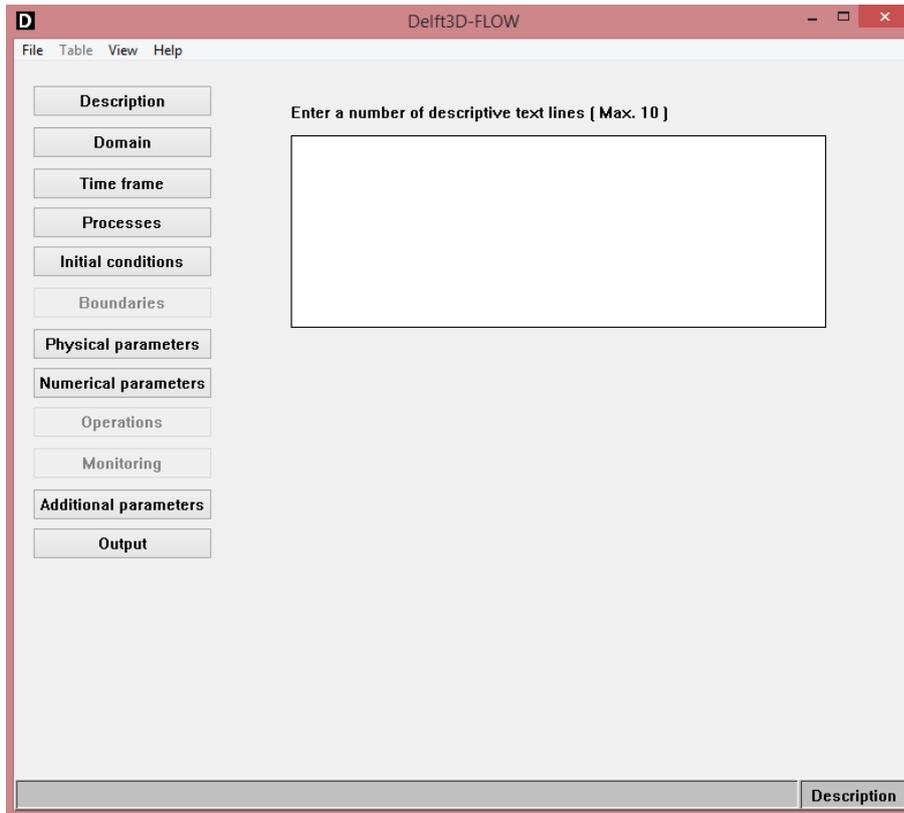


Figura 4.11 – Menu *Flow input* primeiro submenu *Description*

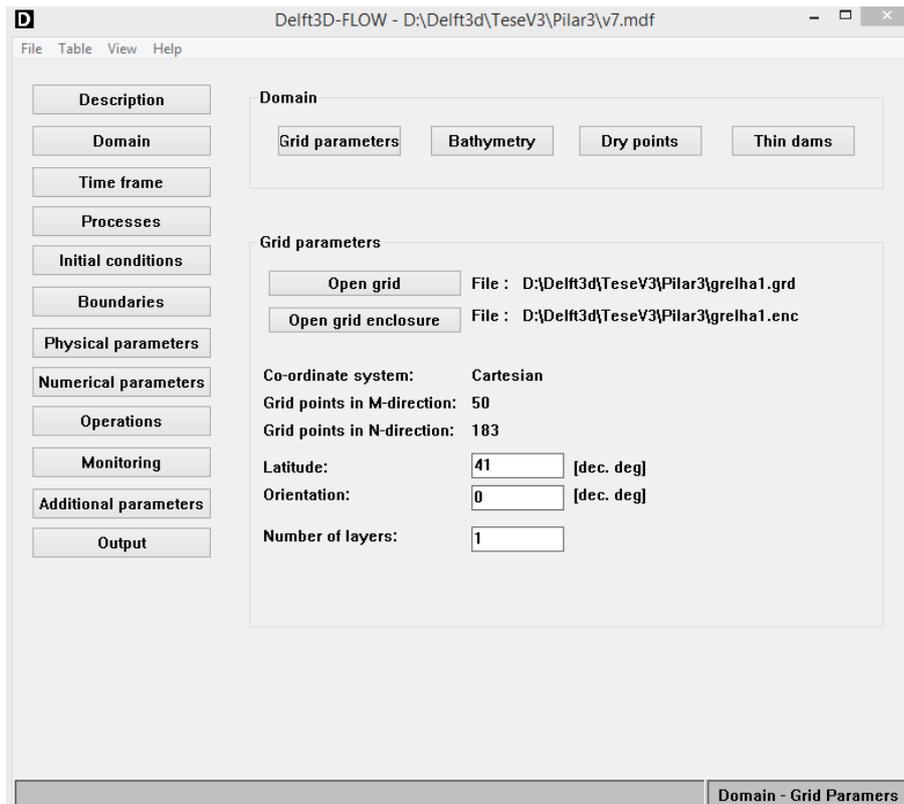


Figura 4.12 - Submenu *Grid parameters*

não carregar nenhum ficheiro, definindo a mesma como uniforme com 5 cm que vai variar nas várias simulações.

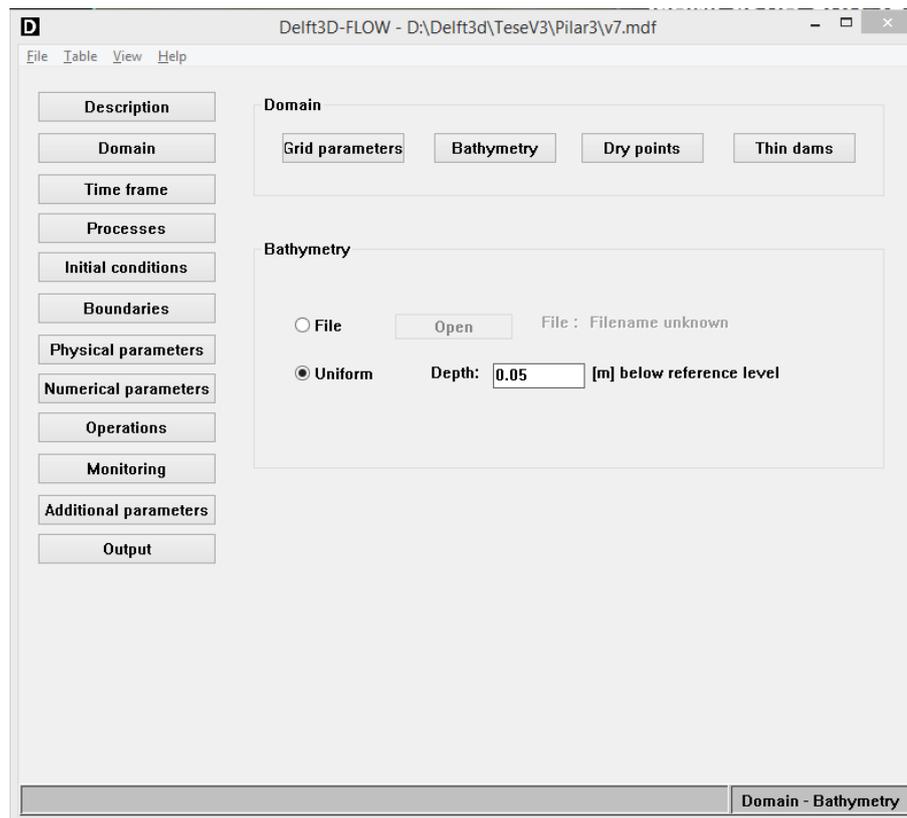


Figura 4.13 - Submenu *Bathymetry*

No submenu *Dry points*, é onde são definidos os pontos secos de forma a simular o pilar, conforme mostra a figura 4.14.

O resultado da seleção destes pontos como pontos secos pode ser observada na figura 4.9, onde foi abordada a malha construída para a simulação do problema.

Uma vez definido o problema a nível do domínio, é necessário definir o mesmo quanto ao período que se quer simular bem como o *Time step* da resolução. Nas simulações efetuadas optou-se por um tempo de simulação de 2 horas e 35 minutos, sendo o *Time step* o valor de 0,0001 minutos, conforme mostra a figura 4.15.

No submenu *Processes* (figura 4.16) são definidas todos os constituintes do fluido tais como a salinidade, a temperatura, poluentes bem como os sedimentos, podendo ser igualmente introduzidas questões físicas na simulação como o vento, ondas ou mesmo um segundo escoamento. Numa primeira fase não serão selecionados nenhum destes elementos, mas em

simulações posteriores serão adicionados os sedimentos, sendo todas as suas características inseridas no submenu *Physical parameters*.

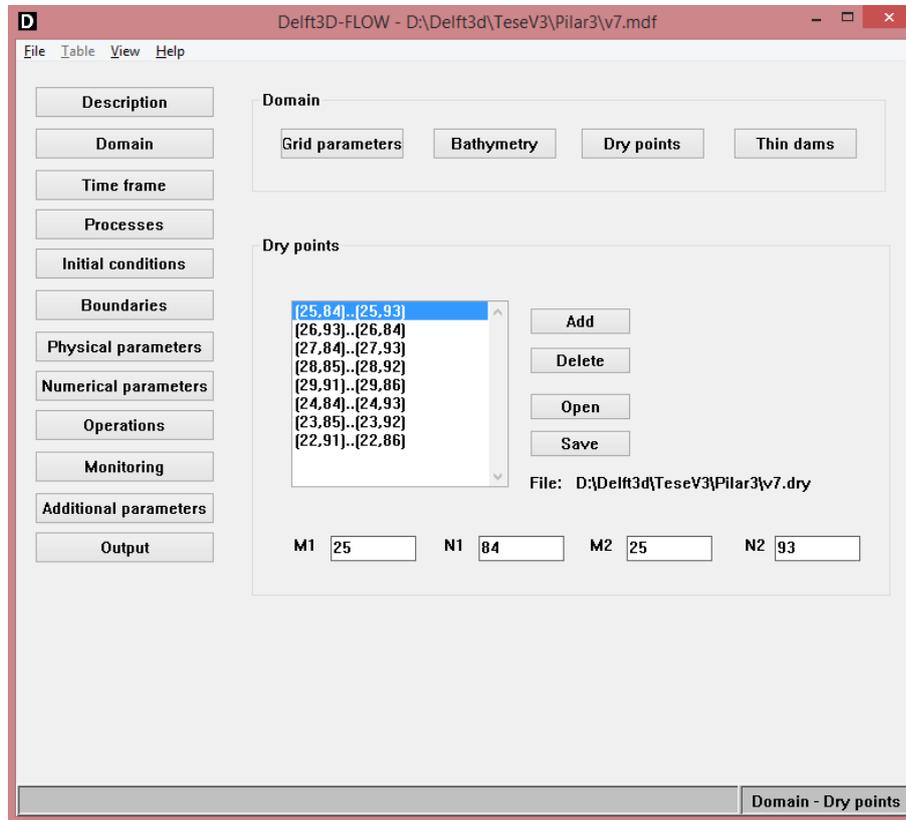


Figura 4.14 - Submenu *Dry points*

Definidos os processos envolvidos nas simulações é necessário definir as condições iniciais. Nas simulações efetuadas foi considerado que o canal tinha um valor de altura de água constante, estando o mesmo cheio. A batimetria foi definida uma profundidade de 5 cm abaixo do nível de referência. Ao nível da altura da água foi atribuído o valor de 0 cm, que representa que o canal estava completamente cheio de água, conforme expresso pela figura 4.17.

Foi necessário definir as condições fronteiras da simulação. Para isso utilizou-se a aba *Boundaries* (figura 4.18), sendo delimitadas as fronteiras bem como as condições das mesmas. Nas simulações efetuadas optou-se por introduzir a velocidade de escoamento de entrada no canal na extremidade esquerda e uma altura de água de saída à direita.

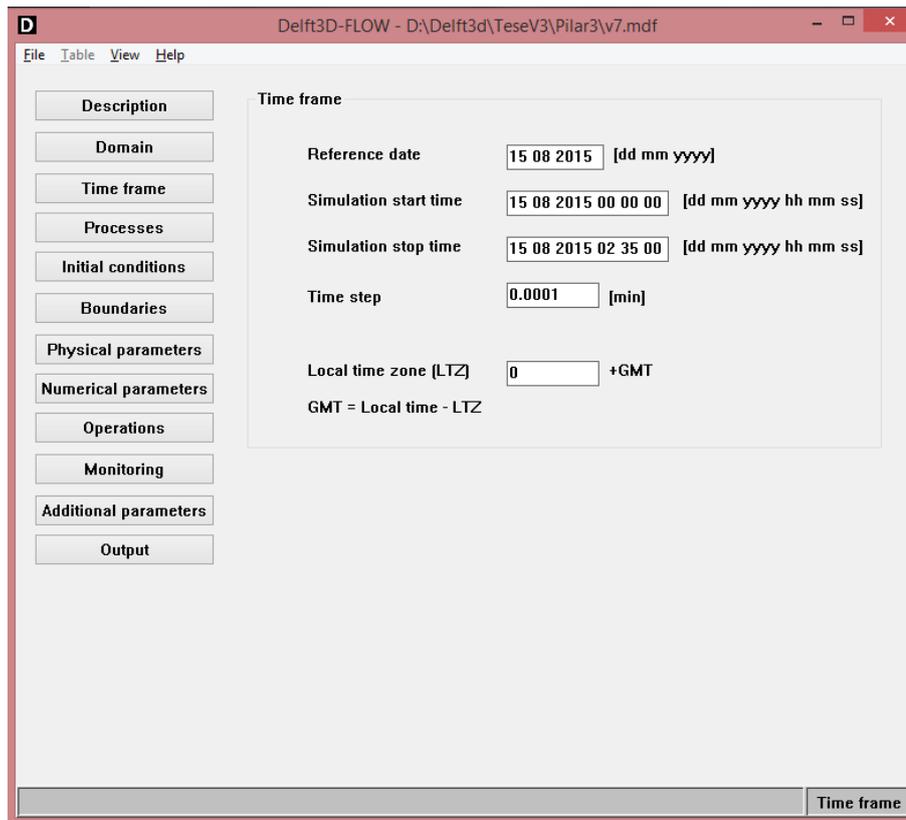


Figura 4.15 - Submenu *Time frame*

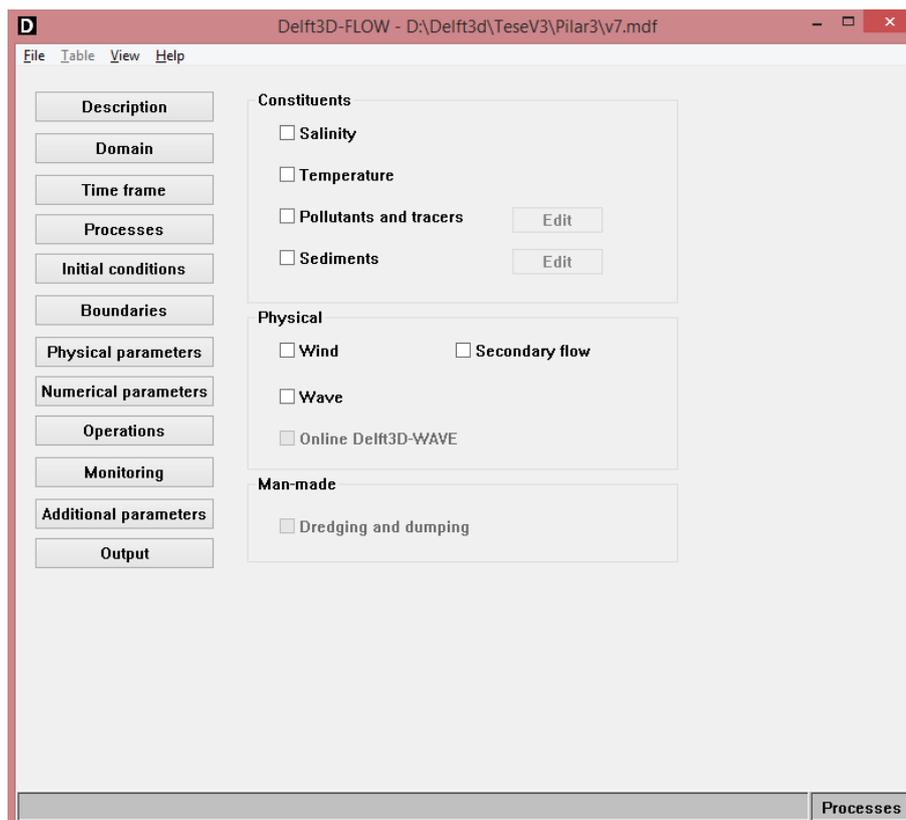


Figura 4.16 - Submenu *Processes*

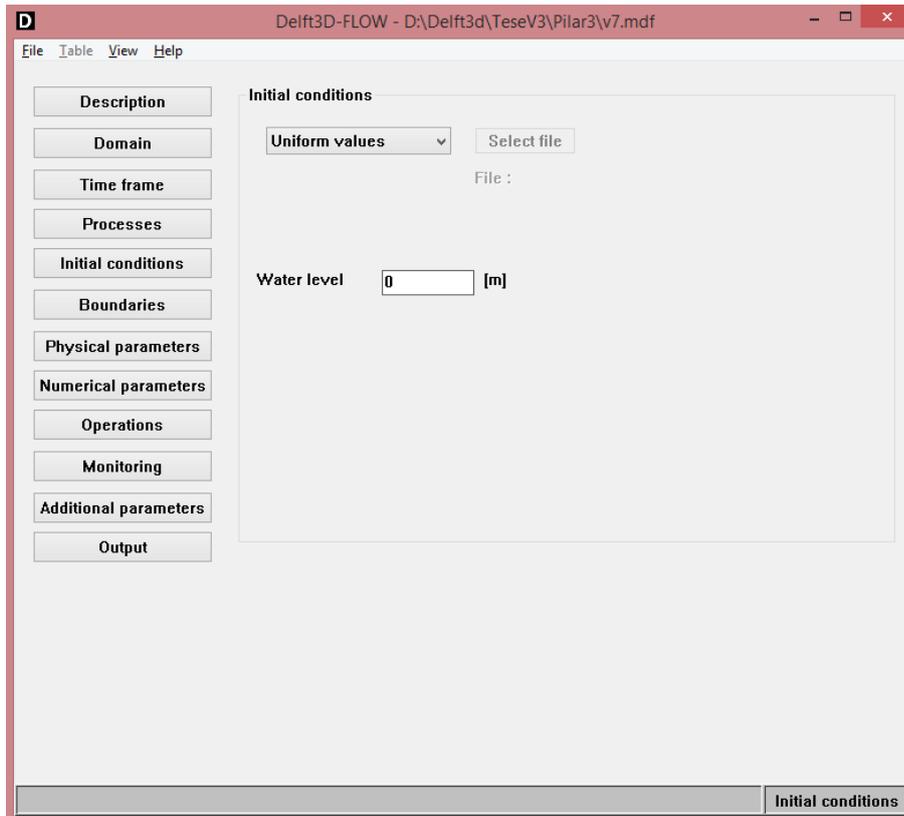


Figura 4.17 - Submenu *Initial conditions*

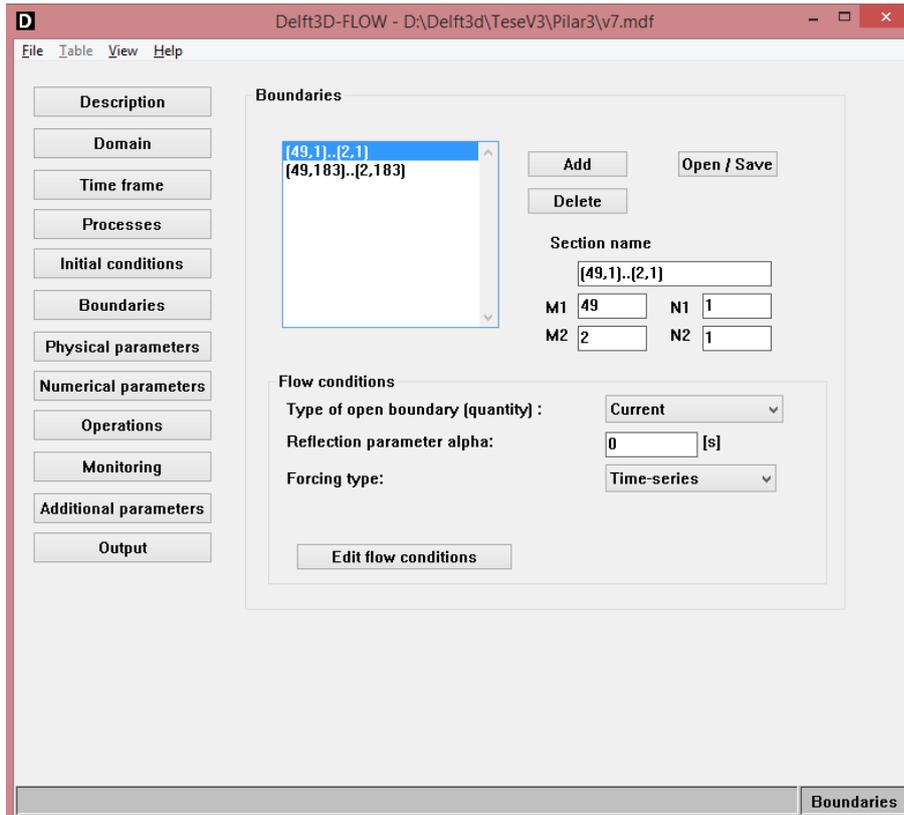


Figura 4.18 - Submenu *Boundaries*

As fronteiras podem ser identificadas na figura 4.19 pelas linhas a azul. A fronteira da esquerda serve de entrada do fluido e a do lado direito serve como saída.

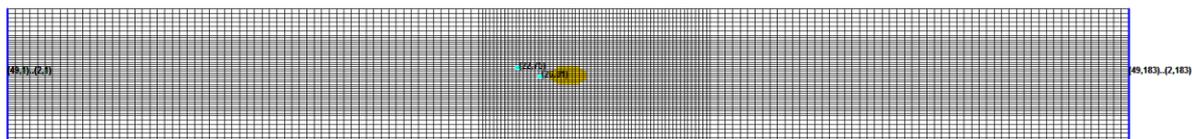


Figura 4.19 - Representação das fronteiras do canal

Na figura 4.20 pode-se observar o exemplo de uma simulação onde foi imposta uma velocidade de escoamento constante ao longo de toda a simulação. No entanto, caso fosse pretendido, era possível optar por criar variações na velocidade de escoamento, com a adição de um maior número de células para diferentes tempos, impondo assim variações no escoamento.

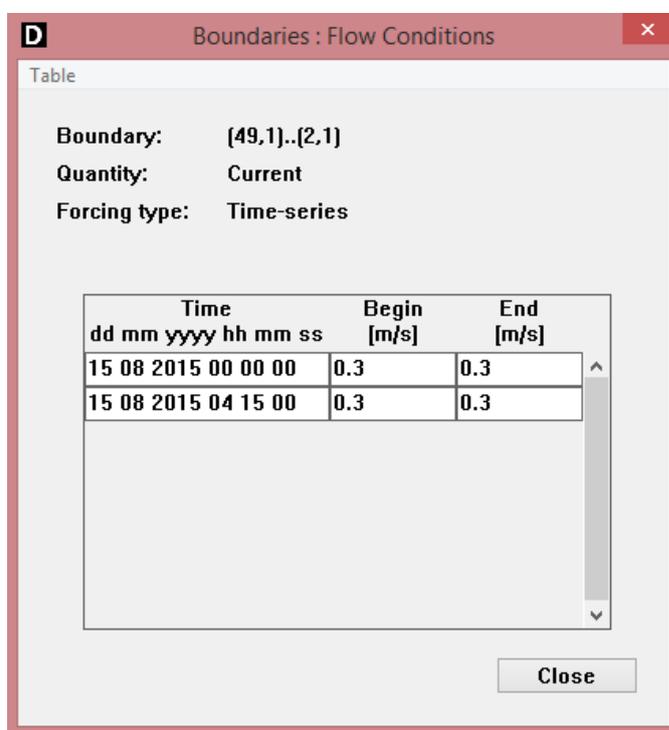
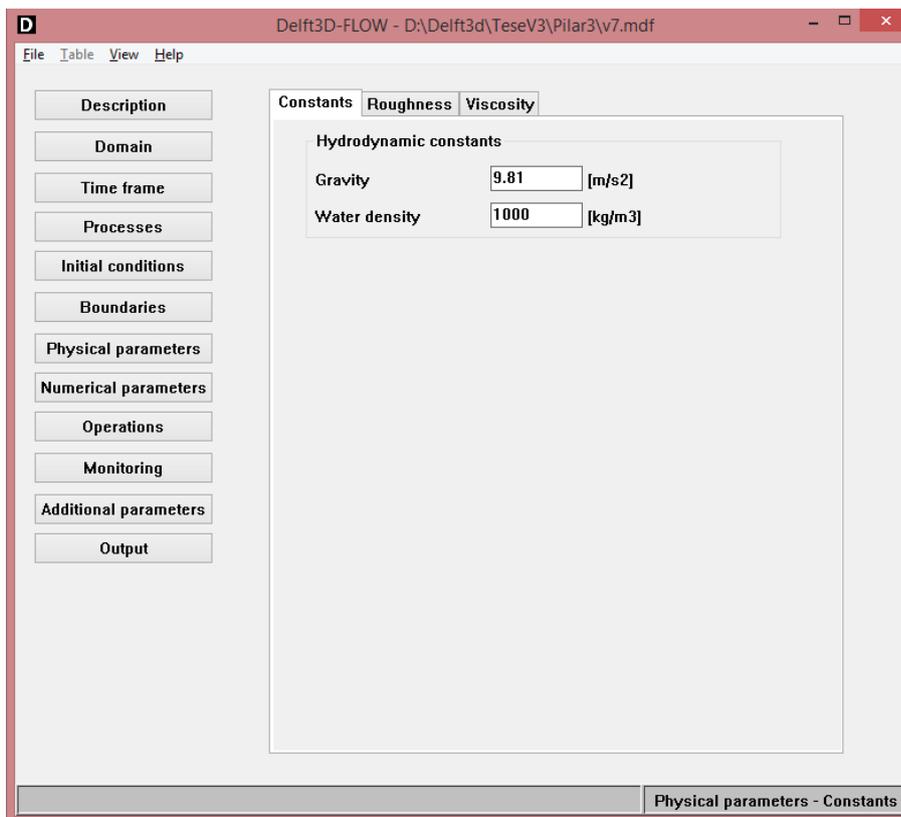


Figura 4.20 - Condições impostas na extremidade esquerda do canal

Finalizada a definição das condições de fronteira, foi necessário proceder a definição dos parâmetros físicos utilizando para isso o submenu *Physical parameters* (figura 4.21). Neste submenu é possível definir as constantes hidrodinâmicas como a gravidade e a densidade da água, usando para o efeito a primeira aba com o nome *Constants*.

Figura 4.21 - Submenu *Physical parameters* aba *Constants*

Na segunda aba, apresentada na figura 4.22, é possível definir a rugosidade das paredes e o fundo. Para o fundo usou-se a formulação de *Manning*, atribuindo um valor para a rugosidade de 0.002 quer verticalmente quer horizontalmente. Quanto a rugosidade das paredes, foi considerado que estas não possuíam qualquer rugosidade.

Por fim, na aba *Viscosity* (figura 4.23) foram introduzidos os dados relativos à viscosidade (*eddy viscosity*) do problema. Neste caso o valor normalmente utilizado corresponde a  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ , mas nesta dissertação devido ao facto de se tratar de um canal de pequena dimensão, e após diferentes testes de validação este valor foi reduzido para valores na ordem dos  $0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$ .

É importante referir que caso fossem adicionados processos, como os sedimentos iriam surgir novas abas para definir todos os parâmetros necessários. Estas abas foram utilizadas numa fase posterior da dissertação.

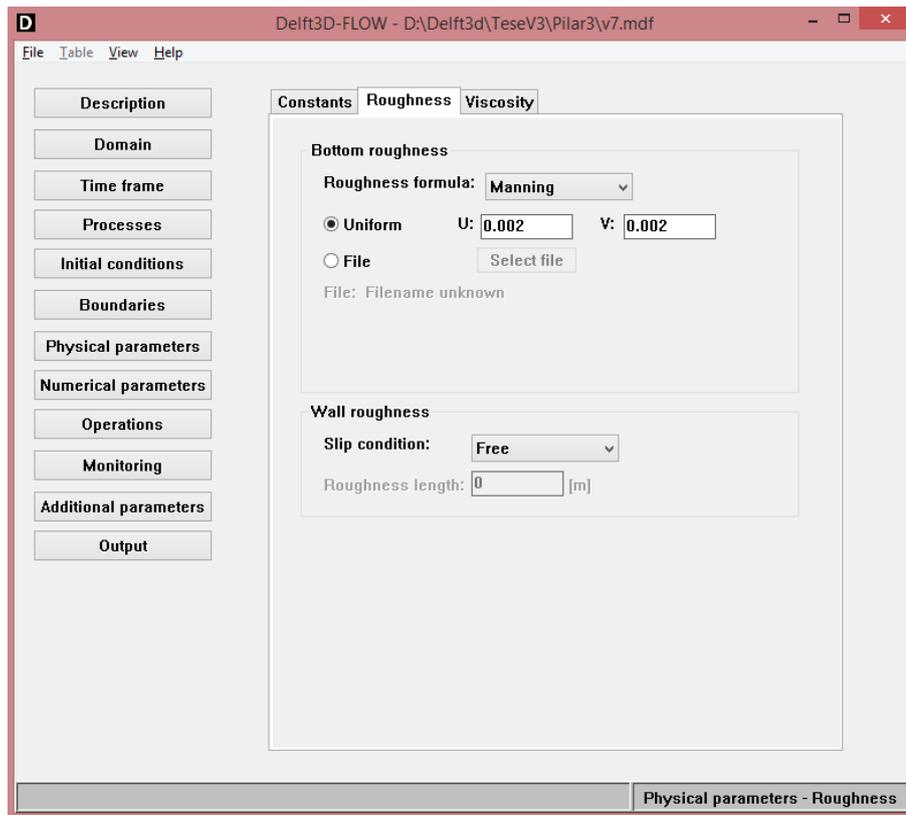


Figura 4.22 - Sub-menu *Physical parameters* aba *Roughness*

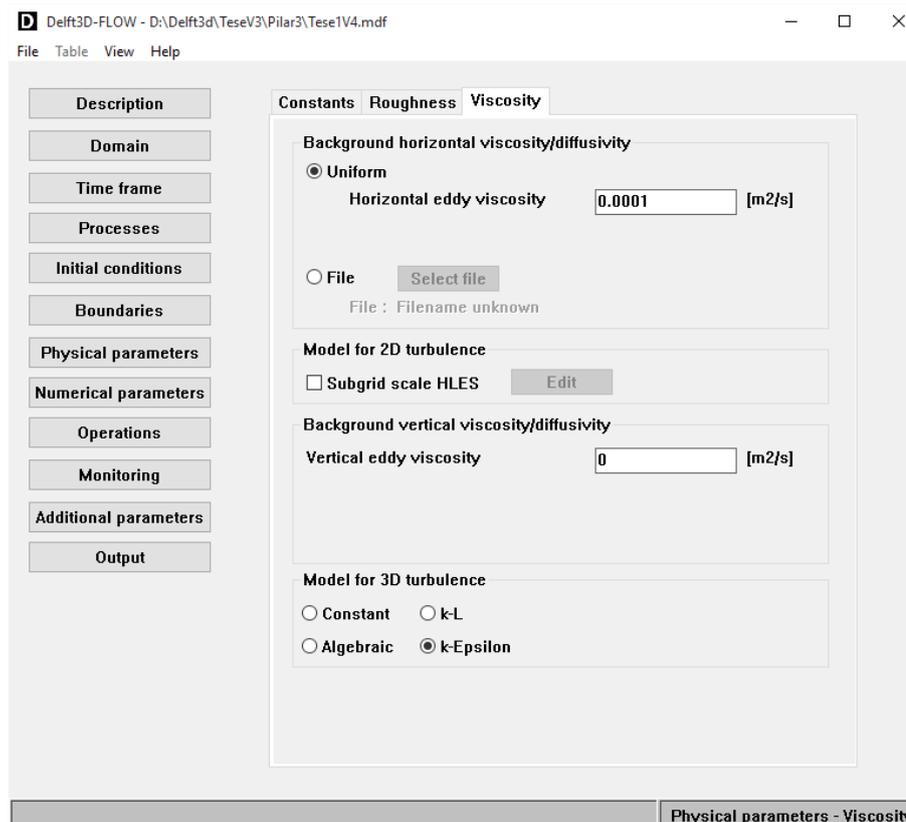


Figura 4.23 - Submenu *Physical parameters* aba *Viscosity*

Definidos os parâmetros físicos foi necessário definir os parâmetros numéricos da simulação. Para isso foi necessário aceder ao submenu *Numerical parameters*, mostrado na figura 4.24. Nele, é possível definir a profundidade limiar, bem como o tempo para suavizar o modelo. A profundidade limite foi definida como 0.0001m e o tempo para suavizar o modelo como 1 minuto. A escolha destes valores deveu-se ao facto de se tratar de simulações de curta duração, apenas 155 minutos, e de se esperarem alterações no fundo quando se estiver a simular com os sedimentos.

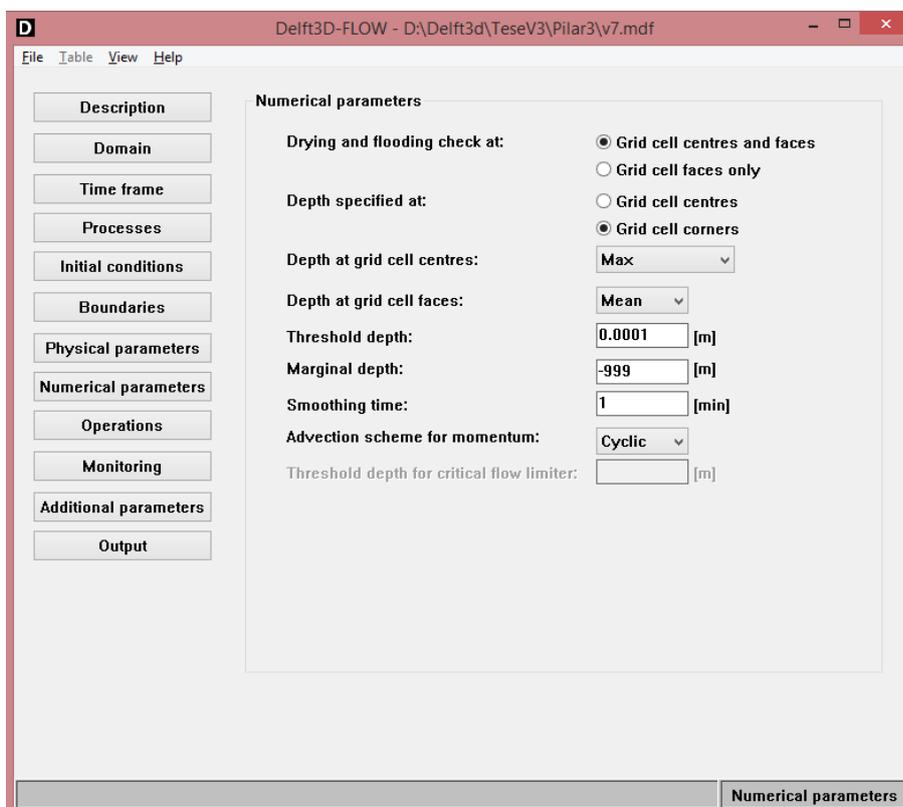


Figura 4.24 - Submenu *Numerical parameters*

O submenu *Operations* é utilizado para introduzir descargas. Como para o caso em questão não se aplica, não foi considerado nas simulações. De seguida temos o submenu *Monitoring*, de extrema utilidade, pois permite adicionar pontos, onde serão armazenadas as várias informações ao longo do tempo possibilitando assim a construção de vários gráficos. Apesar das várias abas disponíveis apenas foi utilizada a primeira, que é a da *Observations*, onde são introduzidos os pontos de observação (figura 4.25). Os pontos selecionados podem ser observados na figura 4.26. Estes pontos foram obtidos a uma distancia de 0,010 m, 0,020 m, 0,040 m, 0,080 m, 0.120 m e 0.200 m da face do pilar, quer para jusante, quer para montante, e considerando o eixo longitudinal central do pilar (figura 4.26).

Os pontos de observação terão de ser em maior número, pois os dados obtidos a nível experimental se encontravam na junção de duas ou mais células da malha construída, daí ser necessário no mínimo o dobro dos pontos de observação, para se ser possível efetuar uma interpolação para o local pretendido.

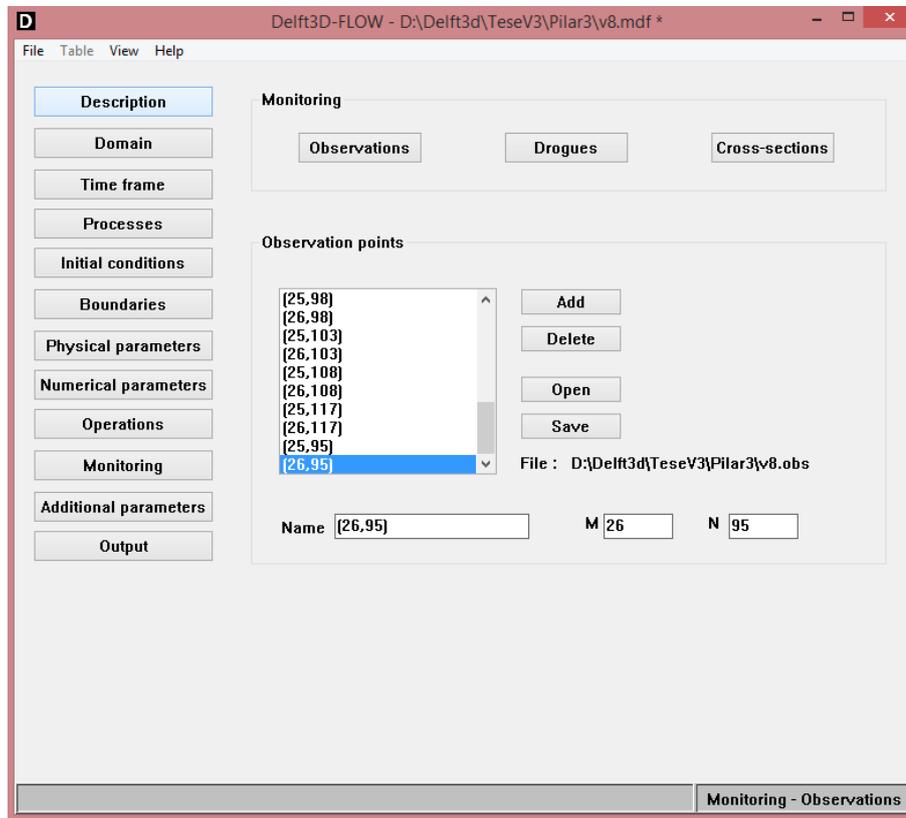


Figura 4.25 - Submenu *Monitoring* aba *Observations*

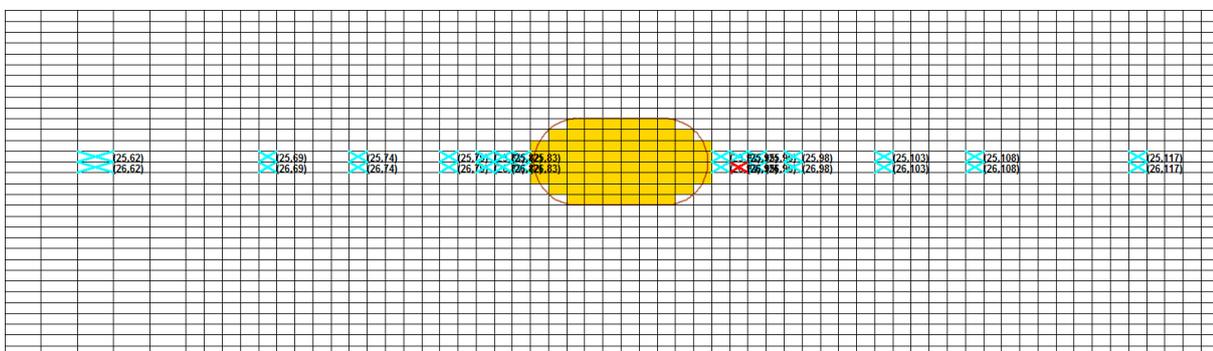


Figura 4.26 - Seleção dos pontos de observação

O submenu *Additional parameters*, não foi utilizado nas simulações. Por fim, temos o submenu *Output* (figura 4.27), dotado de mais 3 abas, sendo estas *Storage*, *Print* e *Details*. Em *Storage* são colocados os resultados que se pretendem armazenar, isto é, apesar de o *timestep* ser igual

a 0,0001 minutos não há interesse em armazenar todos esses dados, uma vez que o espaçamento do mesmo é demasiado pequeno. Este espaçamento é interessante para maior precisão de dados e estabilidade da simulação, mas desnecessário para uma análise dos mesmos. Daí a opção recaiu em armazenar unicamente os dados de minuto a minuto, obtendo assim 156 instantes de análise para cada ponto de observação. Quanto às ferramentas disponíveis na aba *Print* e *Details*, optou-se por deixar tudo como pré-definido pelo *software*.

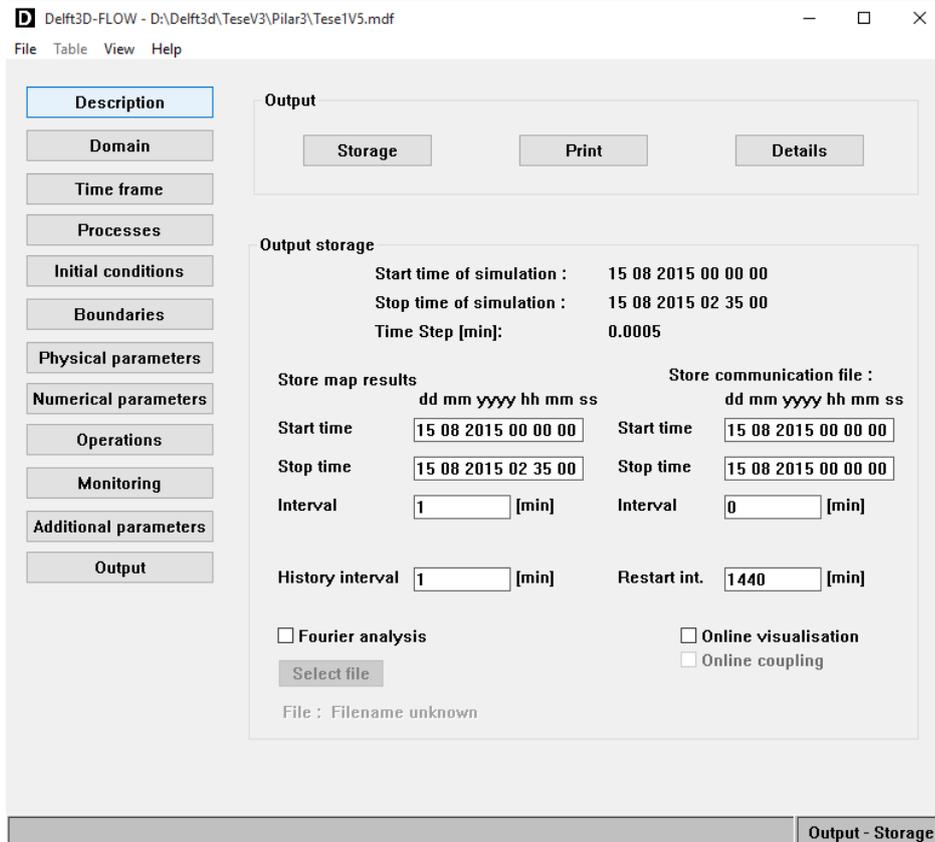


Figura 4.27 - Submenu *Output* aba *Storage*

Finalizada a introdução e caracterização do modelo foi necessário então correr as várias simulações. Cada simulação teve como objectivo avaliar diferentes fenómenos e as variações que este iriam produzir nos resultados.

Nos anexos 1, 2, 3 e 4 pode ser consultada toda a construção dos casos simulados, apresentando-se assim todos os menus e valores utilizados na construção dos mesmos.



## 5 Resultados e Discussão

### 5.1 Conceitos Gerais

Neste capítulo serão abordados as várias configurações a ser simuladas, bem como os resultados obtidos a nível da hidrodinâmica e morfologicamente. As simulações foram realizadas em 2D, sendo apenas a simulação 1 em 3D, pois segundo Simoons (2012), os resultados são similares.

### 5.2 Simulação 1

Este primeiro caso tinha em vista a simulação de um pilar implementado em leito fixo, tendo como objetivo verificar se o modelo construído se encontrava próximo a nível hidrodinâmico da situação encontrada a nível experimental, cujos dados foram obtidos num trabalho já realizado e publicado (Lima, 2014). De forma a ser possível efetuar uma comparação entre os resultados experimentais com os resultados obtidos pela simulação numérica esta simulação teve de ser realizada utilizando as valências 3D, ao contrário das outras que foram realizadas apenas em 2D. Assim, após cerca de 48 horas de processamento, foi dado como terminado o processamento, sendo obtido os seguintes resultados. É importante referir que todas as figuras apresentadas pressupõem um escoamento da esquerda para a direita.

#### 5.2.1 Campo de Velocidades e vorticidade do escoamento

O campo de velocidades que surge com a introdução do pilar é variável ao longo do tempo. Na figura 5.1 é representado o campo de velocidade média em profundidade, obtido 29 minutos após o início da simulação. Na figura 5.2 é possível identificar o desprendimento dos vórtices característicos nestes tipos de escoamentos verificados a jusante do pilar.

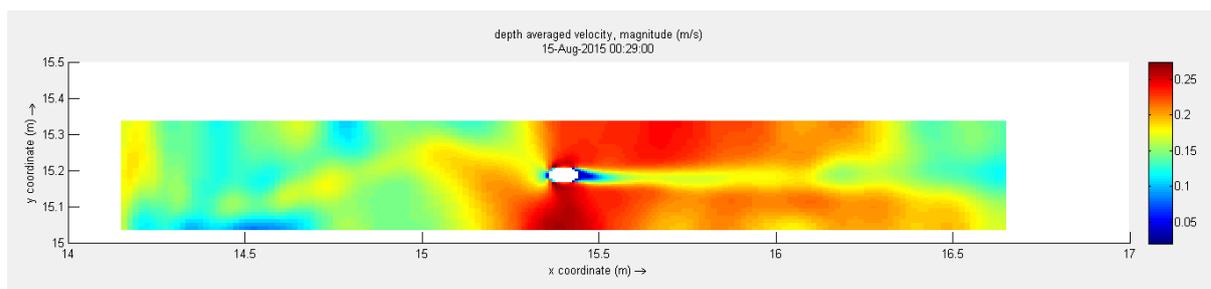


Figura 5.1 - Campo de velocidades médias após 29 minutos

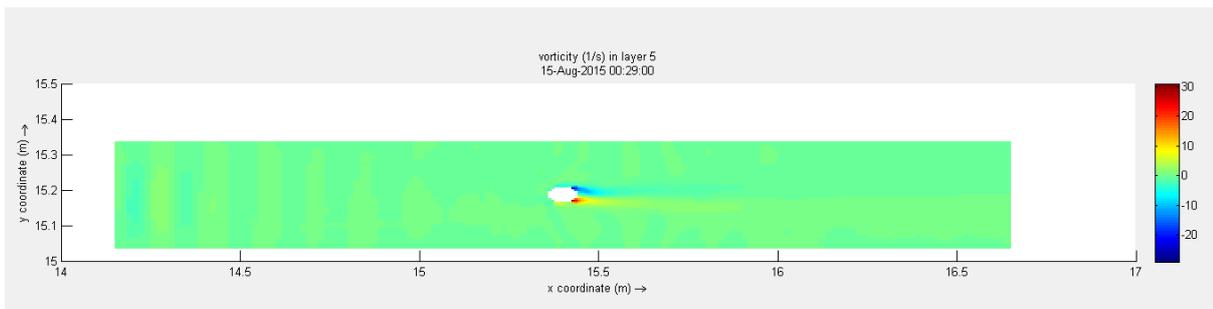


Figura 5.2 - Vorticidade do escoamento após 29 minutos

Da análise da figura 5.1 é possível identificar que a velocidade média do escoamento, à medida que este se aproxima da face a montante do pilar diminui, anulando-se junto à face de montante do pilar. É importante referir que o escoamento simulado apresenta alguma variação nos valores da velocidade do escoamento, devido a ter sido simulado em 3D, o que torna o modelo, segundo *Simoons (2012)*, mais sensível ao *input* de alguns dados. De forma a tornar o modelo menos pesado efetuou-se uma redução do *timestep* da simulação, tendo o mesmo um valor de 0,001 minutos, o que leva a uma redução da qualidade do modelo construído, pois quanto mais pequeno for o *timestep* melhor é a qualidade do modelo.

Nas figuras 5.3 a 5.6 é possível verificar o campo de velocidades do escoamento e a vorticidade em dois instantes distintos.

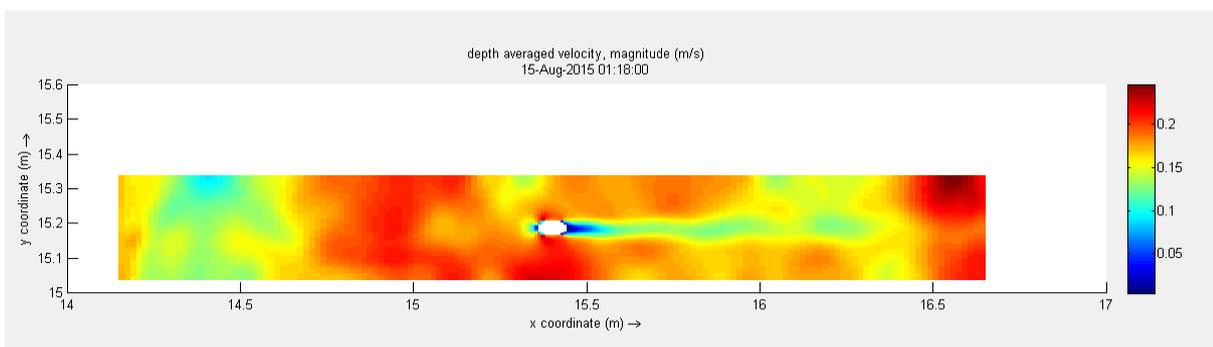


Figura 5.3 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 18 minutos

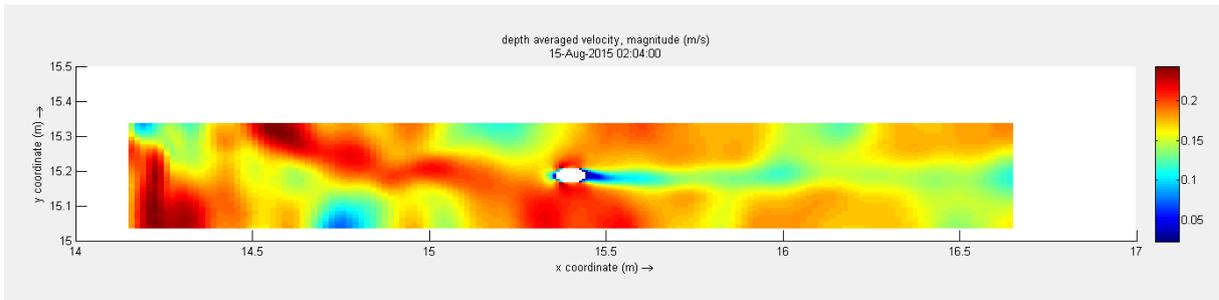


Figura 5.4 - Campo de velocidades médias após 2 horas e 4 minutos

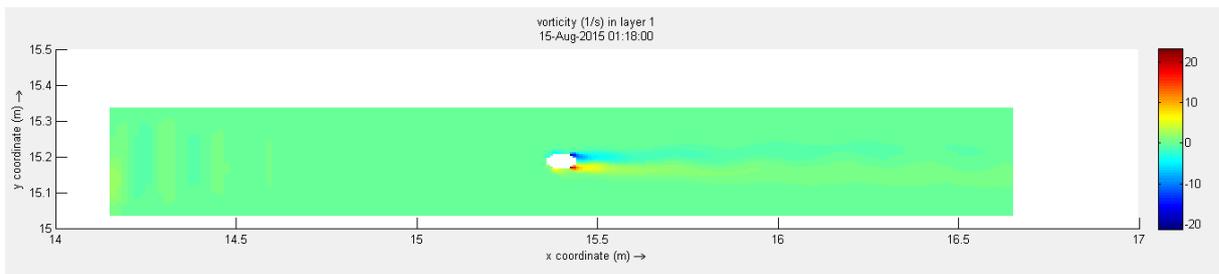


Figura 5.5 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 18 minutos

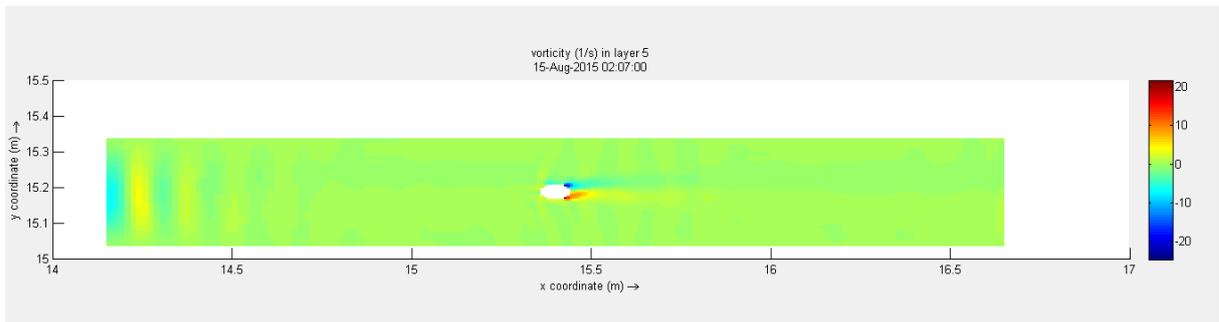


Figura 5.6 - Vorticidade do escoamento após 2 horas e 7 minutos

Da análise das mesmas é facilmente identificável a variação da velocidade média do escoamento, bem como é facilmente identificável o desprendimento dos vórtices que seriam esperados neste tipo de escoamentos.

Nas figuras 5.7 a 5.10 são apresentadas as velocidades verticais verificadas no escoamento a 0,05 cm do fundo e a 0,25 cm do fundo. É possível observar uma semelhança no padrão das velocidades para o mesmo instante, sendo a velocidade vertical superior mais próximo do fundo.

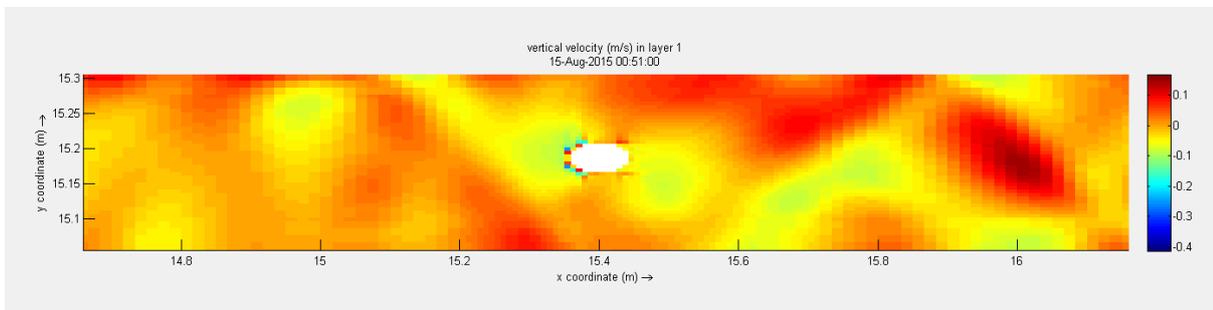


Figura 5.7 - Campo de velocidades verticais a 0,05cm do fundo após 51 minutos

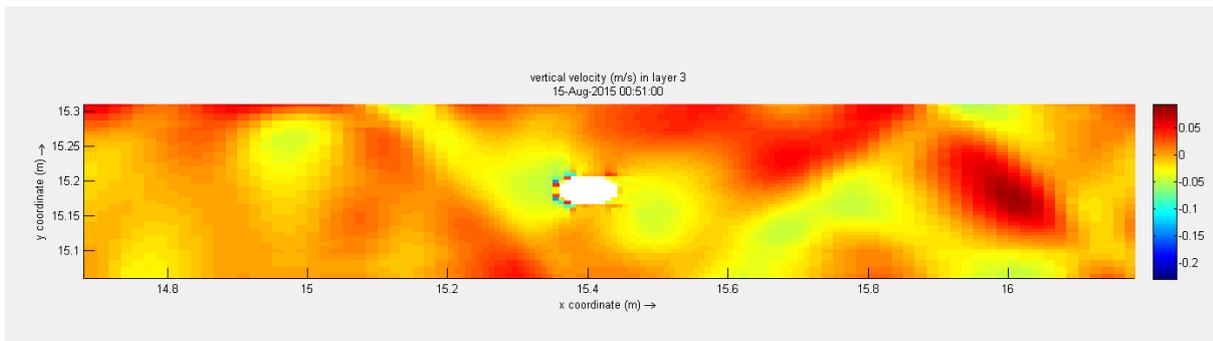


Figura 5.8 - Campo de velocidades verticais a 0,25cm do fundo após 51 minutos

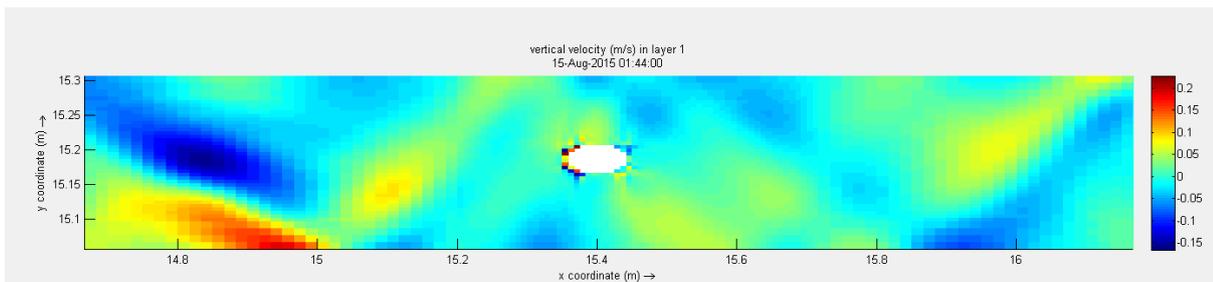


Figura 5.9 - Campo de velocidades verticais a 0,05cm do fundo após 1 hora e 44 minutos

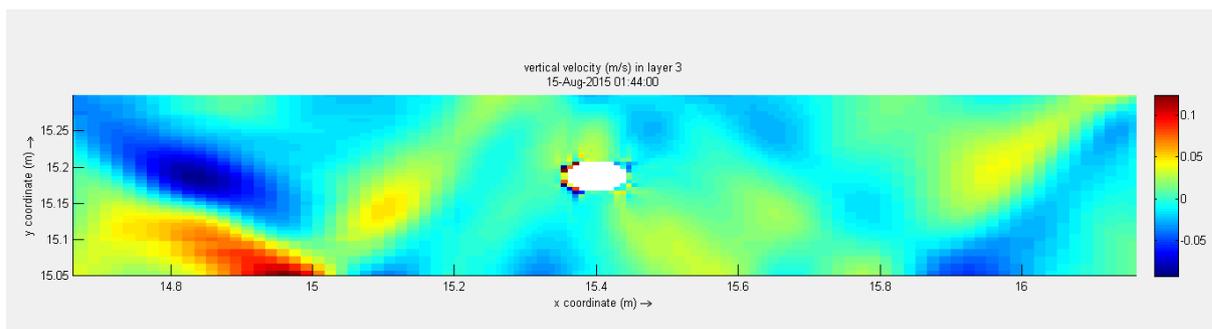


Figura 5.10 - Campo de velocidades verticais a 0,25cm do fundo após 1 hora e 44 minutos

### 5.2.2 Variação da superfície livre

Tal como esperado, e analisando a figura 5.11, verifica-se que existe uma sobre elevação da superfície livre na proximidade da face de montante do pilar. Esta característica provoca alterações no campo de pressões, levando assim segundo Fael (2007) ao surgimento da superfície de enrolamento e também ao escoamento descendente em forma de jato, bem como à separação do escoamento.

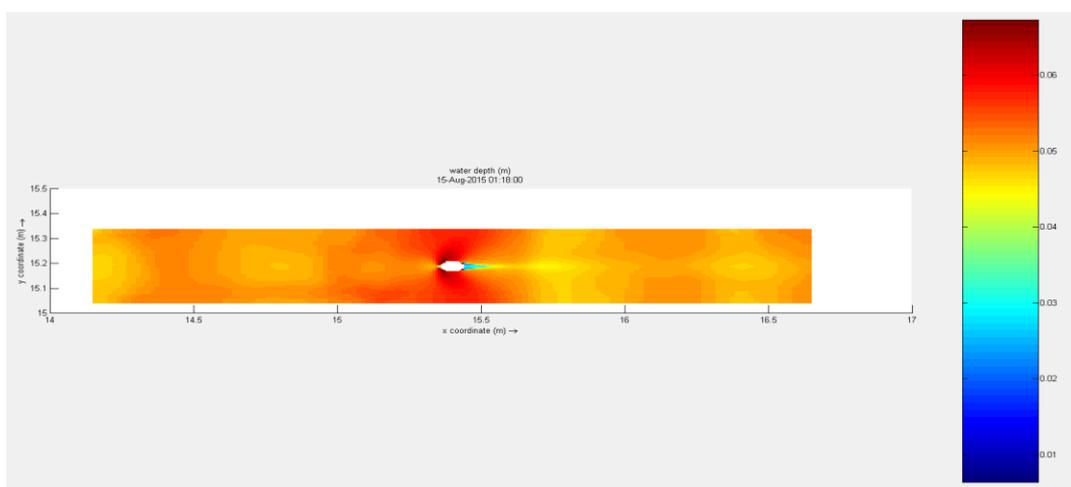


Figura 5.11 - Variação da profundidade

### 5.2.3 Comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos

Os resultados experimentais que se pretendiam simular, tal como referido anteriormente, são os resultados obtidos por Lima (2014). De forma a comparar os resultados optou-se por efetuar uma comparação entre os valores das velocidades médias horizontais obtidas experimentalmente em secções a montante do pilar localizadas a uma distância  $x/D$  entre -5 e -0,125 e os obtidos pela simulação numérica.

O gráfico foi construído adimensionalizando todas as variáveis: a profundidade a que foi medida a velocidade encontra-se adimensionalizada pela altura de água do escoamento, a velocidade obtida foi adimensionalizada pela velocidade média de aproximação do escoamento, e por fim as distâncias à face de montante do pilar (0,010 m, 0,020 m, 0,040 m, 0,080 m, 0,120 m e 0,200 m) foram adimensionalizadas com o diâmetro do pilar. A origem do eixo  $xx$  estava localizada na face de montante do pilar.

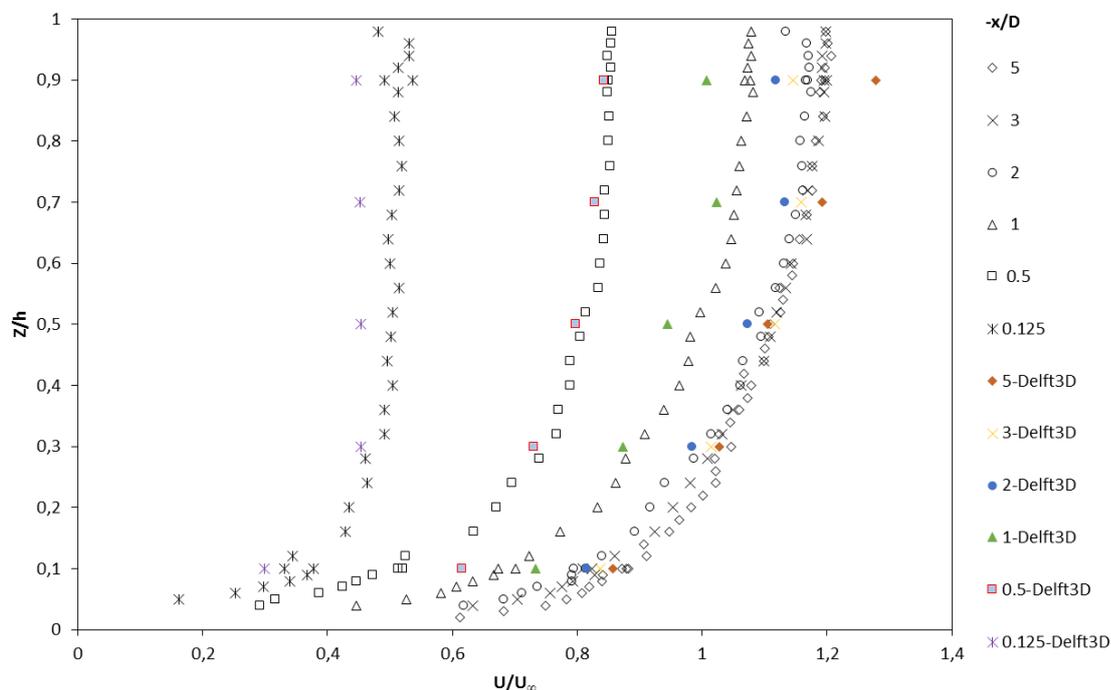


Gráfico 5.1 - Perfis verticais da velocidade axial média adimensionalizada pela velocidade de aproximação média a montante do pilar

Da análise do gráfico 5.1 é possível constatar que os valores obtidos através da simulação numérica são quase sempre inferiores aos verificados no ensaio laboratorial, sendo que apenas os valores obtidos para a distância de 0,020 m ( $-x/D=0,5$ ) são praticamente coincidentes com os obtidos experimentalmente.

Esta situação pode dever-se a duas hipóteses: a primeira é por apenas se ter simulado uma parte do canal apesar das condições hidrodinâmicas serem as mesmas; e uma segunda hipótese pode dever-se facto de se ter utilizado o modelo Standard  $k-\varepsilon$  para efetuar as simulações.

### 5.3 Simulação 2

Verificada a qualidade do modelo construído inicialmente, nesta segunda simulação efetuada já sobre leito de sedimentos, pretendia-se que servisse como termo de comparação para as alterações efetuadas na geometria do pilar para deste modo avaliar o impacto que estas alterações teriam, quer no comportamento hidrodinâmico do escoamento, bem como o comportamento dos sedimentos. É importante referir mais uma vez que todas as figuras apresentadas do canal pressupõem um escoamento da esquerda para a direita.

#### 5.3.1 Campo de Velocidades e vorticidade do escoamento

Tal como no caso anterior, é possível observar facilmente nas figuras 5.16 a 5.18 o desprendimento dos vórtices no escoamento, bem como a diminuição da velocidade do escoamento (figuras 5.12 a 5.14) com o aproximar do pilar, tal como o esperado.

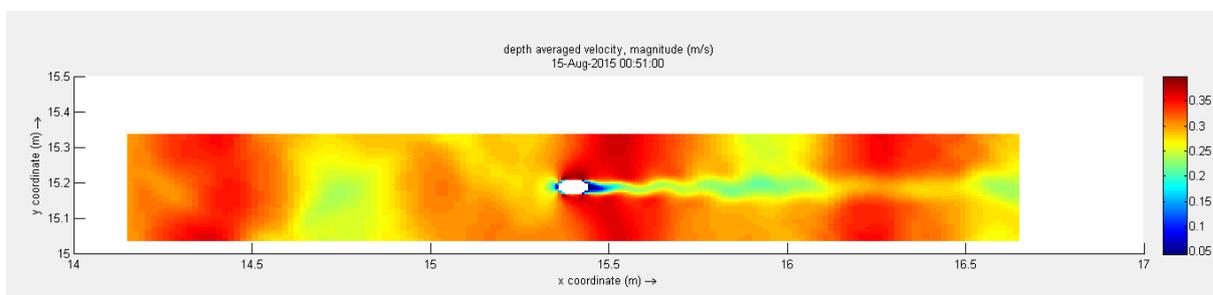


Figura 5.12 - Campo de velocidades médias após 51 minutos

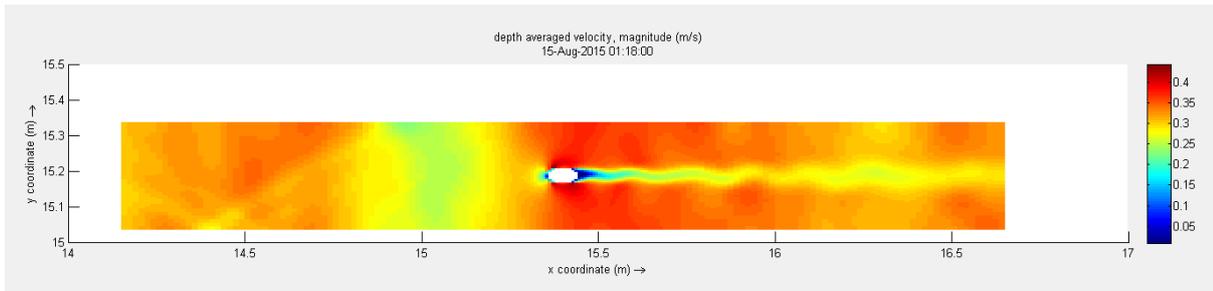


Figura 5.13 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 18 minutos

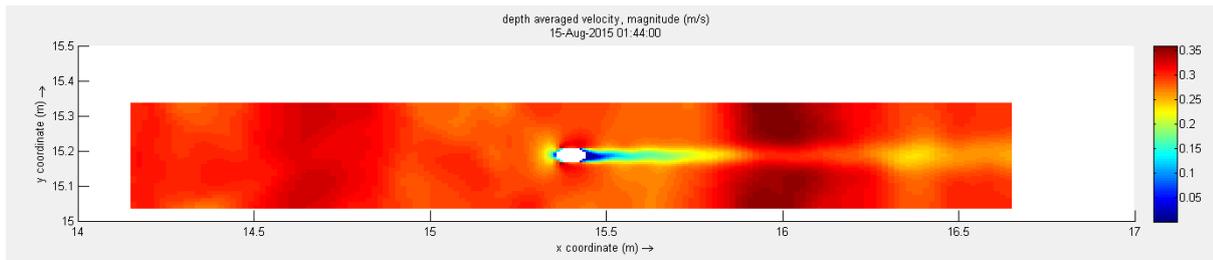


Figura 5.14 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 44 minutos

Efetuada uma comparação dos resultados obtidos no escoamento a nível da velocidade para os vários instantes da simulação é possível constatar que ocorre uma variação no escoamento a jusante do pilar.

Na figura 5.15 é possível observar o número de *Froude* associado ao escoamento após 1 hora e 18 minutos, sendo na figura 5.16 possível observar a vorticidade associada ao escoamento, obtido 1 hora e 18 minutos após o início da simulação.

O número de *Froude* foi obtido pelo *software Delft3d*, que recorre à seguinte formulação:

$$Fr = \frac{|U|}{\sqrt{g \times h}} \quad (5.1)$$

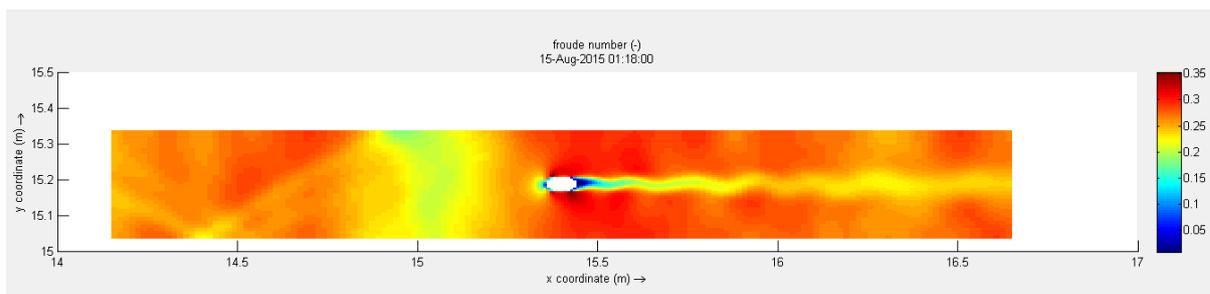


Figura 5.15 - Número de *Froude* do escoamento após 1 hora e 18 minutos

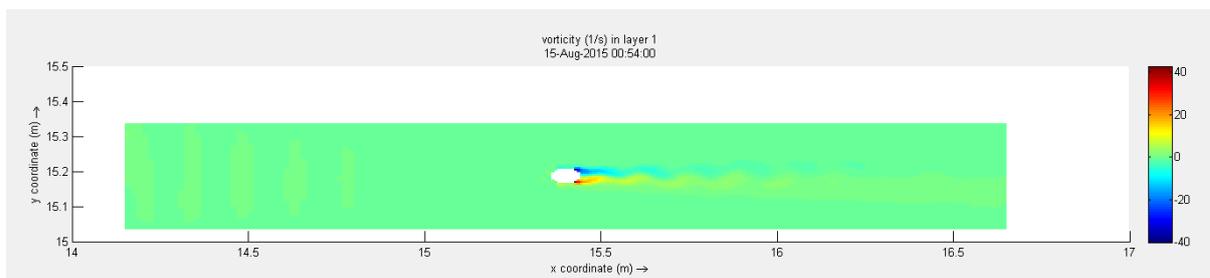


Figura 5.16 - Vorticidade do escoamento após 54 minutos

É possível verificar que o número de *Froude* é de cerca de 0,25 o qual corresponde a um número de *Reynolds* de cerca de  $1,2 \times 10^4$  para a maior parte do canal, apresentando uma redução do mesmo com o aproximar do pilar, sendo que são formados vórtices imediatamente a jusante do pilar, é possível verificar que os vórtices que surgem vão de encontro ao esperado, apresentando uma padrão similar ao verificado para regimes com um número de *Reynolds*, compreendido entre 40 a  $3 \times 10^5$ , tal como se pode verificar na tabela 2.1.

Da análise dos resultados obtidos para a vorticidade em diferentes instantes é possível identificar novamente o fenómeno do crescimento e desprendimento de vórtices, quer na parte superior do pilar, vórtices representados a azul, bem como na parte inferior do pilar, vórtices representados a vermelho.

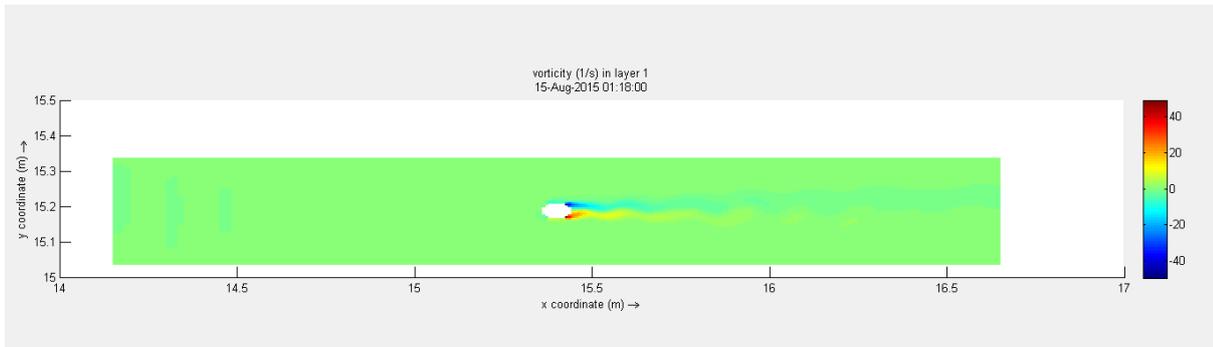


Figura 5.17 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 18 minutos

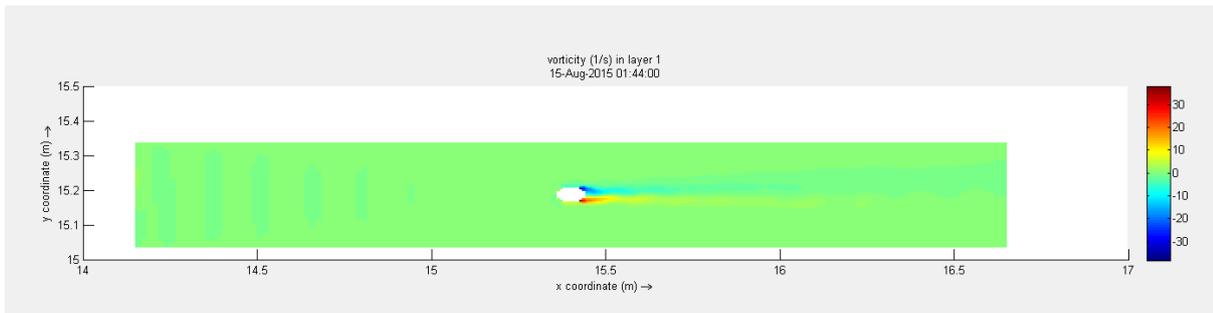


Figura 5.18 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 44 minutos

### 5.3.2 Variação da superfície livre

Mais uma vez, tal como na simulação anterior é possível verificar que o comportamento apresentado pelo escoamento vai de encontro ao esperado, observando-se a sobre elevação da superfície livre com o aproximar do pilar.

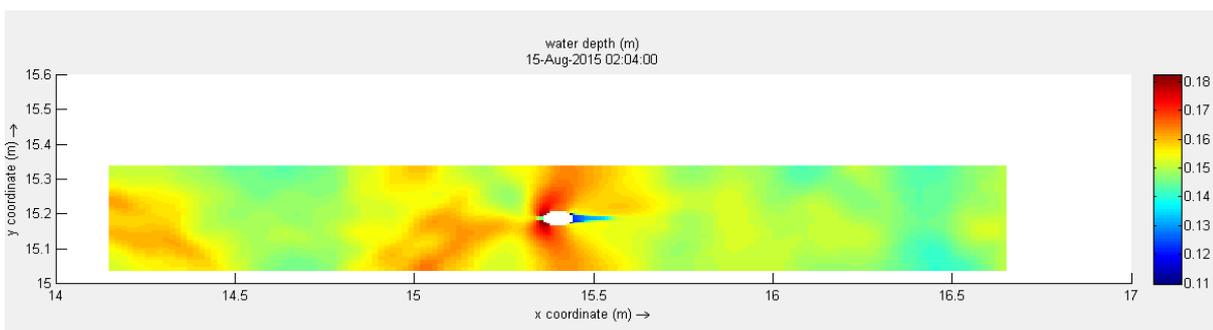


Figura 5.19 - Variação da profundidade

### 5.3.3 Comportamento dos sedimentos

Os resultados a nível de zona de sedimentação/erosão no canal neste caso em estudo e apresentados nas figuras 5.20 a 5.23, têm em vista servir como base para estudar o que as alterações na geometria do pilar originam no comportamento dos sedimentos.

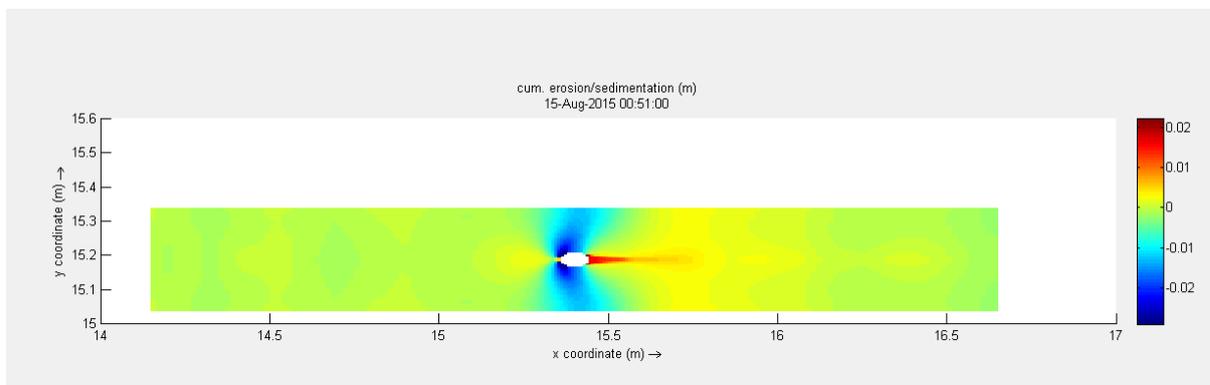


Figura 5.20 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 18 minutos

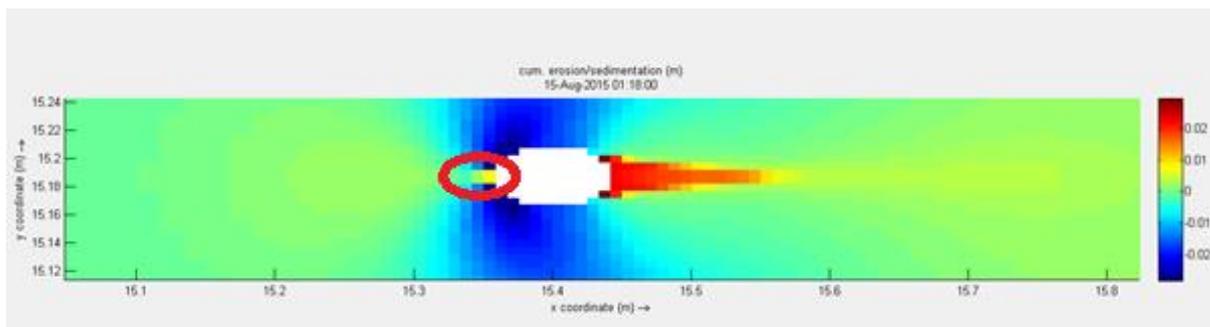


Figura 5.21 - Pormenor da sedimentação/erosão na proximidade do pilar após 1 hora e 18 minutos

É possível verificar que nos resultados obtidos se verifica que as zonas de erosão se encontram principalmente a montante do pilar, sendo que a sedimentação se dá a jusante do mesmo. Importa referir que na zona assinalada com um círculo vermelho, não ocorre erosão mas sim sedimentação. Esta situação pode dever-se à malha utilizada pelo *software* ser uma malha estruturada ortogonal, não permitindo um correto contorno do pilar na referida zona, formando

assim, uma espécie de parede que deste modo leva ao surgimento da ligeira sedimentação verificada. Outra possível causa deste problema pode ser a dimensão dos sedimentos utilizados que poderiam ser demasiado grandes para o escoamento imposto. Observa-se igualmente que ao contrário do esperado na zona imediatamente a jusante do pilar, apenas se observa sedimentação e não erosão como seria de esperar (Leite (2010), Leite (2013) e Azevedo (2014)).

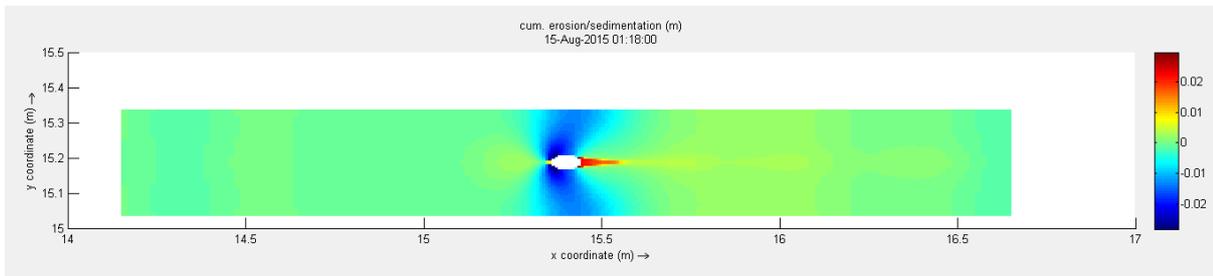


Figura 5.22 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 18 minutos

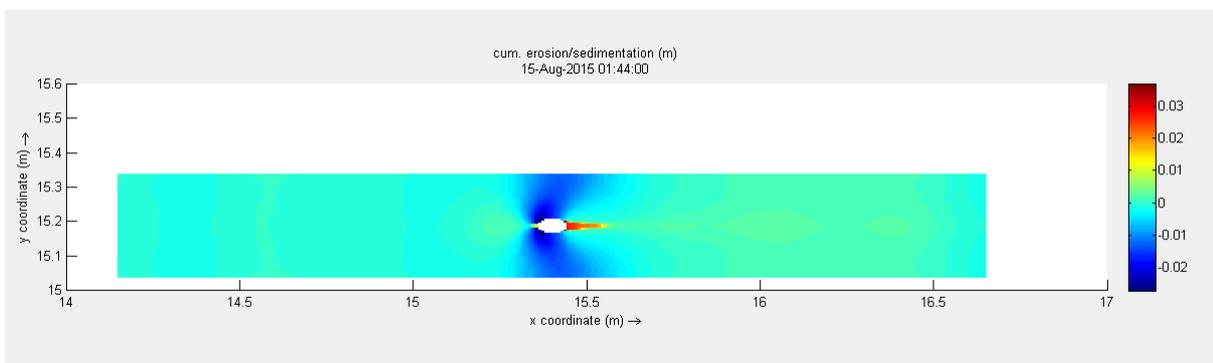


Figura 5.23 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 44 minutos

Na análise das figuras 5.22 e 5.23 é possível verificar que a cavidade de erosão vai aumentando de tamanho com o decorrer da simulação.

### 5.4 Simulação 3

Nesta simulação pretendia-se verificar as alterações que decorrem quer no comportamento do escoamento, quer no comportamento dos sedimentos, quando se introduz uma ranhura a todo o comprimento do pilar.

### 5.4.1 Campo de Velocidades e vorticidade do escoamento

Com a introdução de uma ranhura no pilar, e comparado com a situação exposta na simulação 2, é possível verificar que ocorreu uma diminuição na máxima velocidade média atingida. No entanto continua a verificar-se a diminuição da velocidade do escoamento com o aproximar do pilar e o desprendimento de vórtices no escoamento mantém-se. As figuras 5.24 a 5.26 mostram a evolução temporal dos campos de velocidade, e as figuras 5.28 a 5.31 evidenciam o padrão de vórtices nos instantes temporais correspondentes.

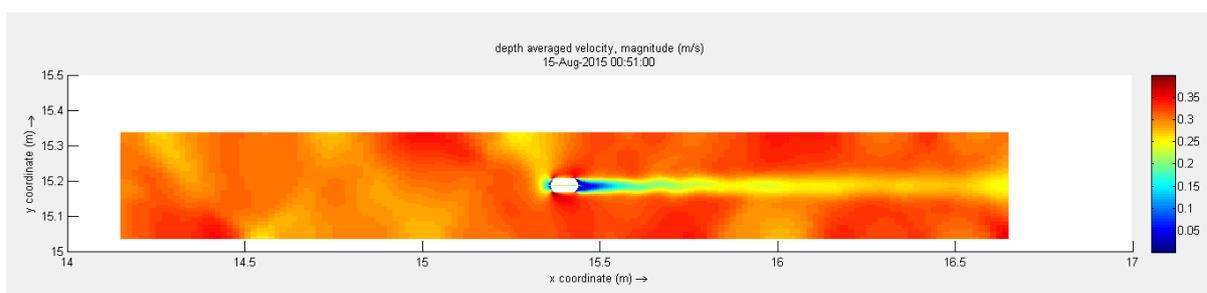


Figura 5.24 - Campo de velocidades médias após 51 minutos

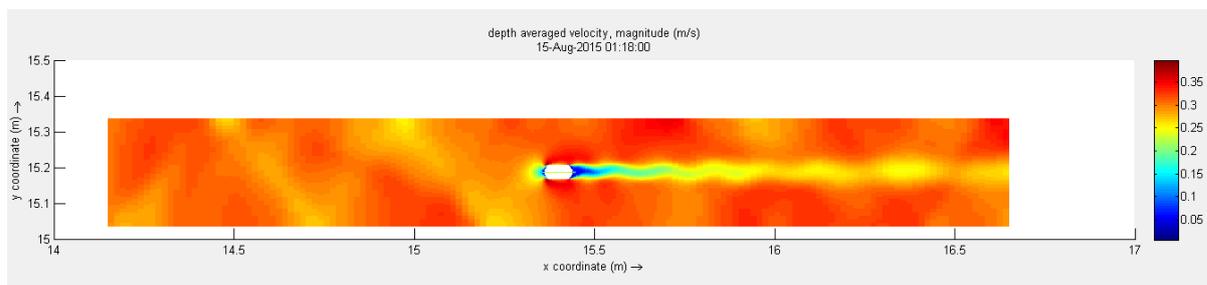


Figura 5.25 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 18 minutos

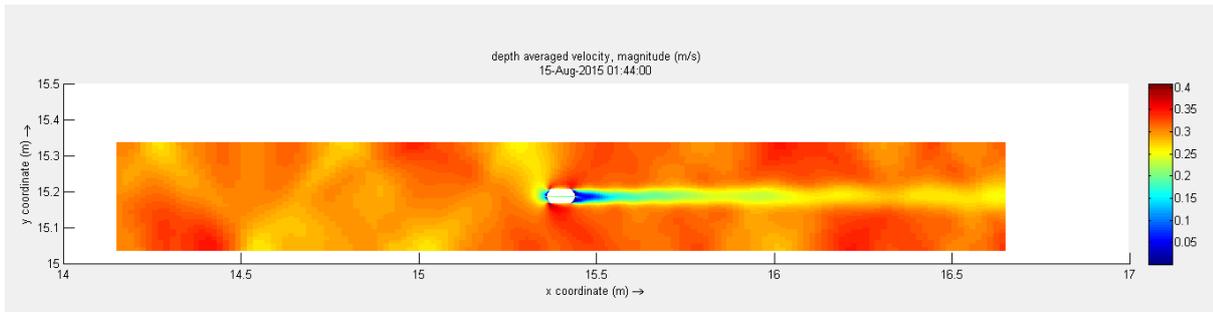


Figura 5.26 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 44 minutos

Da análise das figuras 5.24 e 5.26, e comparando com o obtido na simulação 2, é possível verificar que o escoamento vai sofrer uma variação menor no campo de velocidades médias obtidas para o canal, mais concretamente na zona a jusante do pilar ao longo da simulação.

Tal como a velocidade média, o número de *Froude*, sofreu uma ligeira diminuição, em todo o canal, passando de valores máximos de cerca de 0,35 para 0,30 após 1 hora e 18 minutos, da situação padrão, simulação 2, para a atual, simulação 3, respetivamente. Continua a observar-se uma diminuição do número de *Froude* à medida que o escoamento se aproxima do pilar.

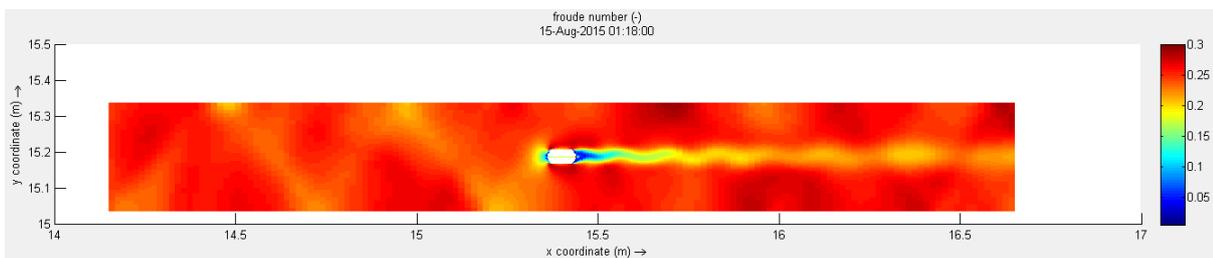


Figura 5.27 - Número de *Froude* do escoamento após 1 hora e 18 minutos

Já quanto à vorticidade do escoamento é possível verificar um aumento da mesma, passando de valores na ordem dos  $40 \text{ s}^{-1}$  para valores na ordem dos  $60 \text{ s}^{-1}$ .

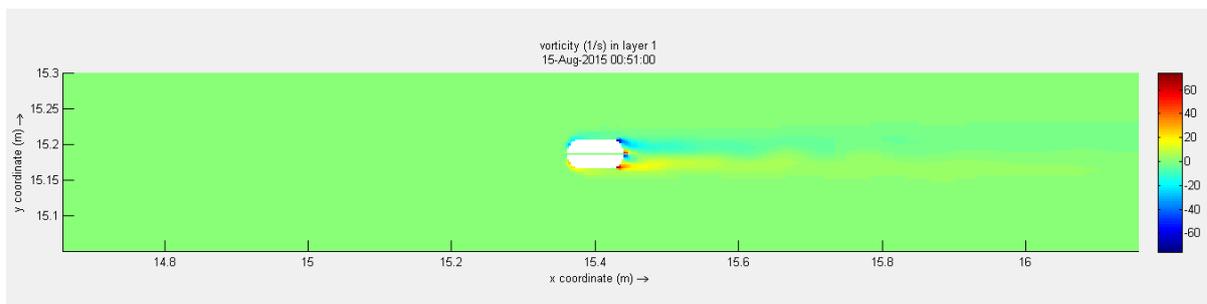


Figura 5.28 - Vorticidade do escoamento após 51 minutos

Na figura 5.31, que mostra em pormenor a vorticidade observada na proximidade do pilar, observa-se que surge uma nova zona de vorticidade na zona onde se procedeu à introdução da ranhura. É possível verificar que com a introdução da mesma, imediatamente a montante do pilar, surgem também os primeiros vórtices, situação que não se verificava na situação padrão sem ranhura (simulação 2).

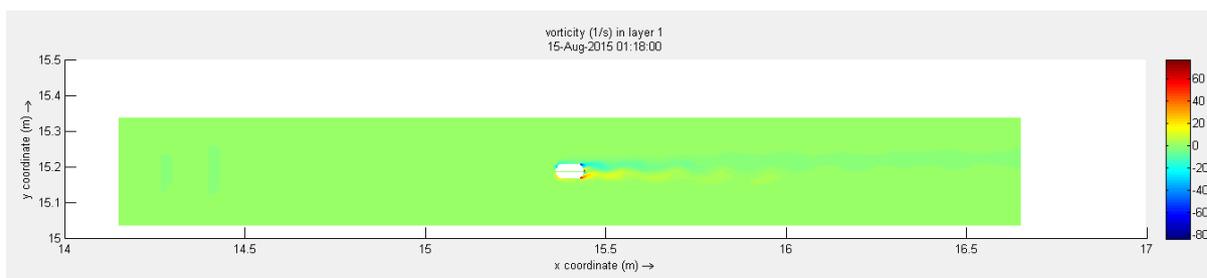


Figura 5.29 - Pormenor da vorticidade na proximidade do pilar após 1 hora e 18 minutos

Mais uma vez é possível verificar o crescimento e desprendimento dos vórtices sendo que agora surgem mais 2 zonas de vorticidade na face a jusante do pilar.

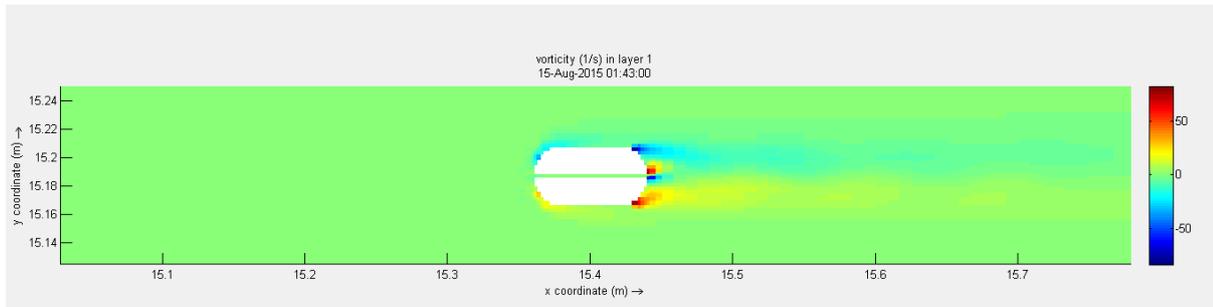


Figura 5.30 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 43 minutos

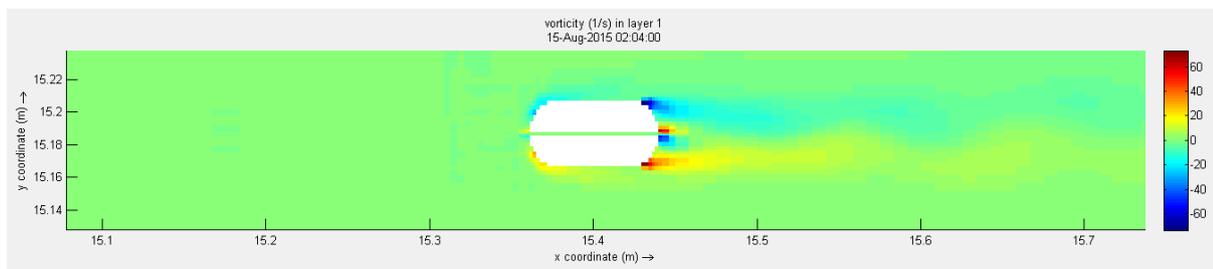


Figura 5.31 - Vorticidade do escoamento após 2 horas e 4 minutos

#### 5.4.2 Variação da superfície livre

Apesar da introdução da ranhura no pilar é possível constatar que se mantém a sobre elevação da superfície livre na proximidade da face de montante do pilar mais concretamente na zona lateral do pilar. No entanto, verifica-se que na zona assinalada pela circunferência preta (a montante do pilar), não se verifica a sobrelevação do escoamento, esta situação pode dever-se à introdução da ranhura no pilar.

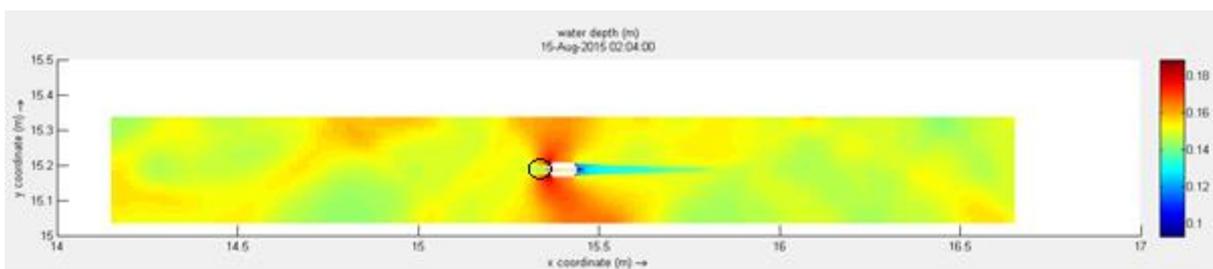


Figura 5.32 - Variação da profundidade

Quanto à zona a jusante do pilar verifica-se que o efeito do pilar com a ranhura leva a um prolongamento na zona onde se verifica uma ligeira diminuição da profundidade do escoamento. A nível da máxima elevação é possível constatar que o mesmo não difere muito da situação encontrada na simulação 2 sendo que os resultados obtidos se encontram na mesma gama de valores.

### 5.4.3 Comportamento dos sedimentos

Ao nível do comportamento dos sedimentos, é possível constatar que a introdução de uma ranhura central no pilar leva a que não ocorra erosão na sua parte frontal sendo a mesma localizada numa zona mais lateral do mesmo. Também é possível constatar que, tal como ocorreu com a variação da superfície livre, a zona de sedimentação se alongou, em comparação com a situação verificada na simulação 2. As figuras 5.33 a 5.36 apresentam a evolução temporal morfológica para instantes específicos.

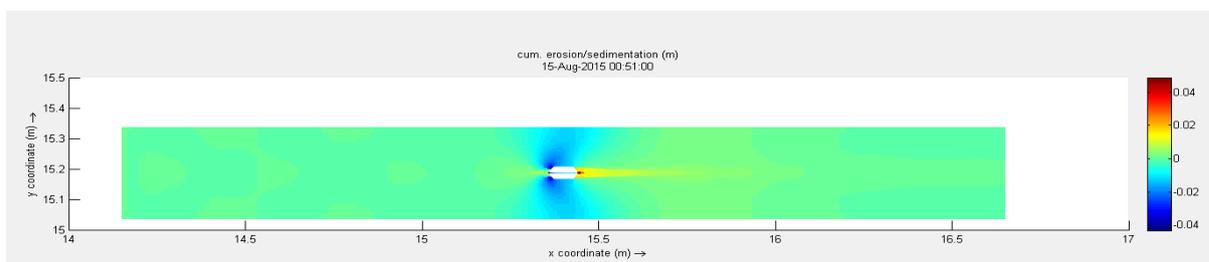


Figura 5.33 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 51 minutos

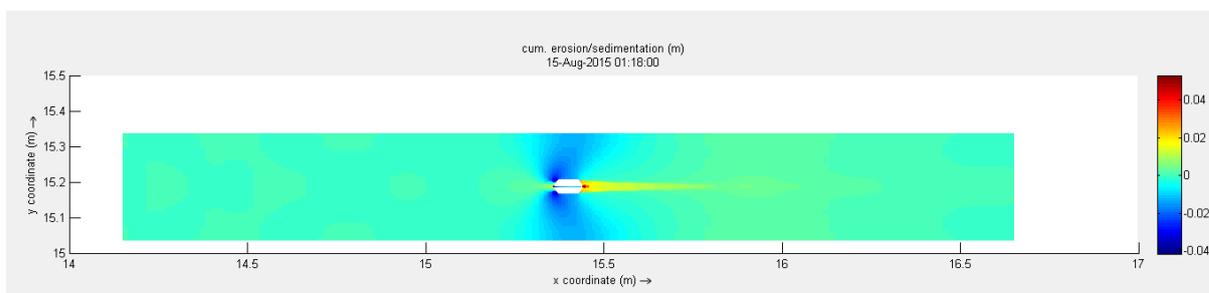


Figura 5.34 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 18 minutos

Da análise dos resultados obtidos é também possível constatar que com a introdução da ranhura a zona crítica onde ocorre sedimentação se encontra imediatamente a jusante da ranhura introduzida no pilar, tal como ocorre na simulação 2.

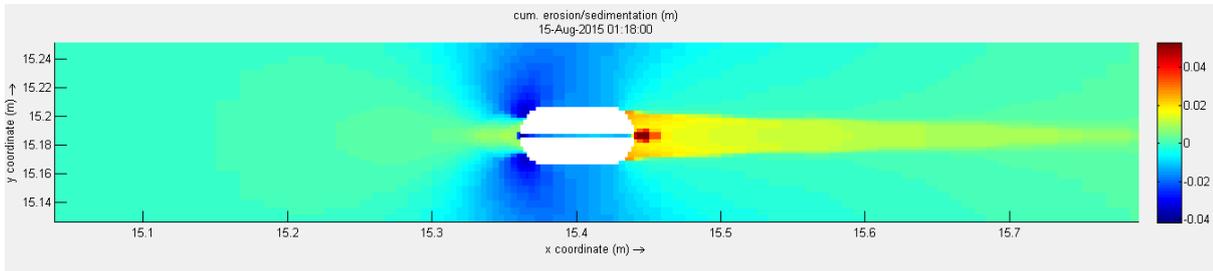


Figura 5.35 - Pormenor da sedimentação/erosão no pilar após 1 hora e 18 minutos

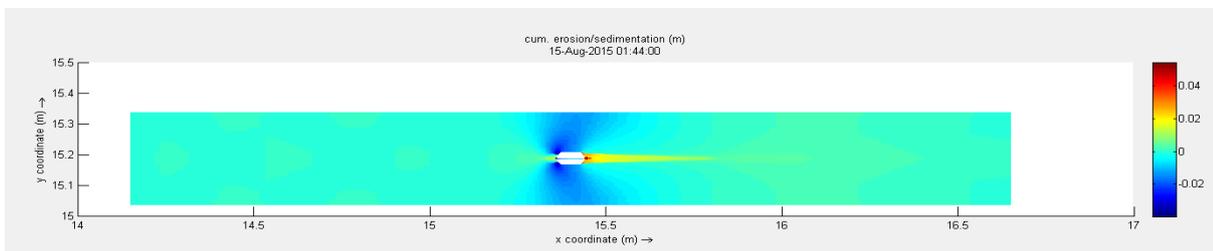


Figura 5.36 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 44 minutos

Mais uma vez é possível verificar que a cavidade de erosão vai aumentando com o decorrer da simulação, não chegando nunca a uma situação de equilíbrio.

## 5.5 Simulação 4

Nesta última simulação era pretendido verificar as alterações que decorriam no escoamento, tal como no comportamento dos sedimentos, quando são introduzidas duas ranhuras a todo o comprimento do pilar.

### 5.5.1 Campo de Velocidades e vorticidade do escoamento

Com a introdução de duas ranhuras no pilar, é possível verificar na análise da figura 5.37, e comparando com a figura 5.24 da simulação 3, que o campo de velocidades médias, contínua

dentro dos mesmos valores, não se produzindo assim uma grande variação no mesmo. É possível constatar que se regista igualmente uma diminuição na velocidade do escoamento com o aproximar do pilar, observando-se idêntico desprendimento de vórtices. No entanto, pode-se verificar que o desprendimento dos mesmos assume um padrão menos definido e mais suavizado.

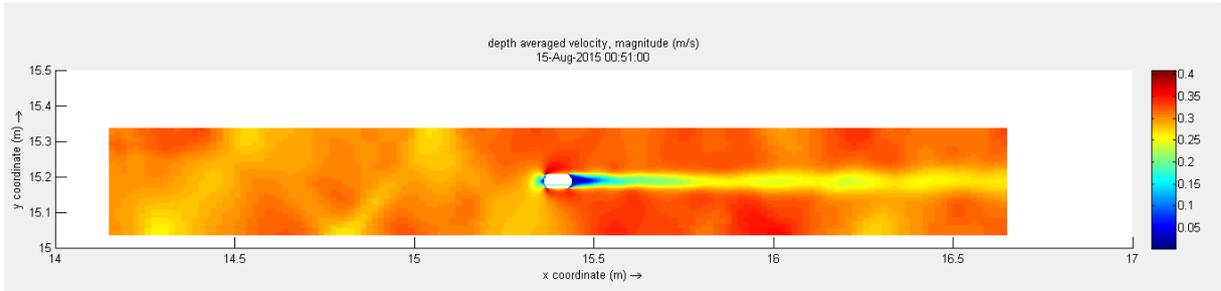


Figura 5.37 - Campo de velocidades médias após 51 minutos

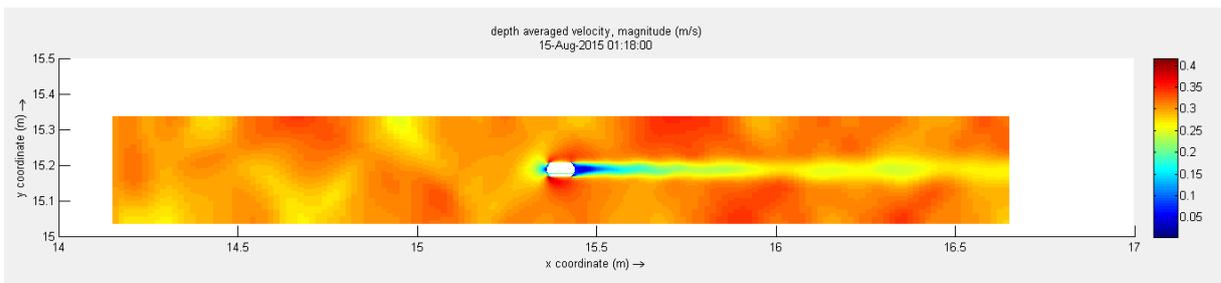


Figura 5.38 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 18 minutos

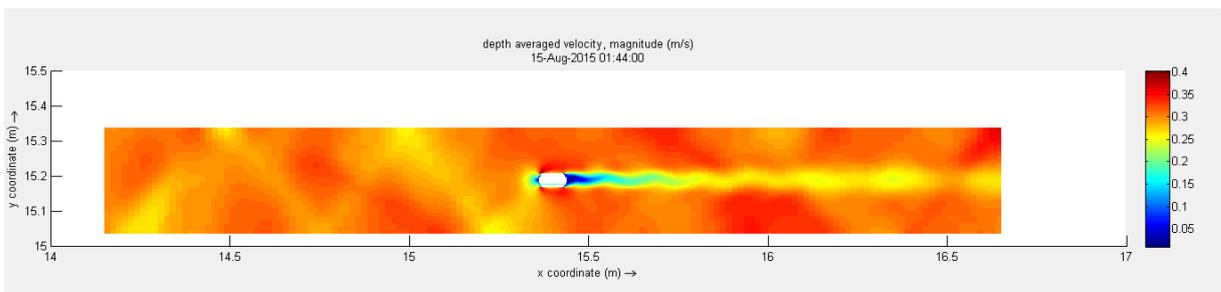


Figura 5.39 - Campo de velocidades médias após 1 hora e 44 minutos

Da análise das figuras 5.37 e 5.38 e comparando com as figuras 5.25 e 5.26 da simulação 3, respetivamente, é possível constatar que a introdução de duas ranhuras decentralizadas leva a uma maior variação na velocidade a jusante do pilar comparativamente ao caso de apenas uma ranhura central.

A nível do número de *Froude*, é possível constatar, na figura 5.40, que a introdução de uma segunda ranhura levou a nova diminuição do mesmo na generalidade do canal, sendo que o máximo registado com a segunda ranhura pelos é aproximadamente igual a 0,30, em vez do valor de 0,35 registado no caso do pilar sem nenhuma ranhura e idêntico ao valor de 0,3 no caso do pilar com uma ranhura.

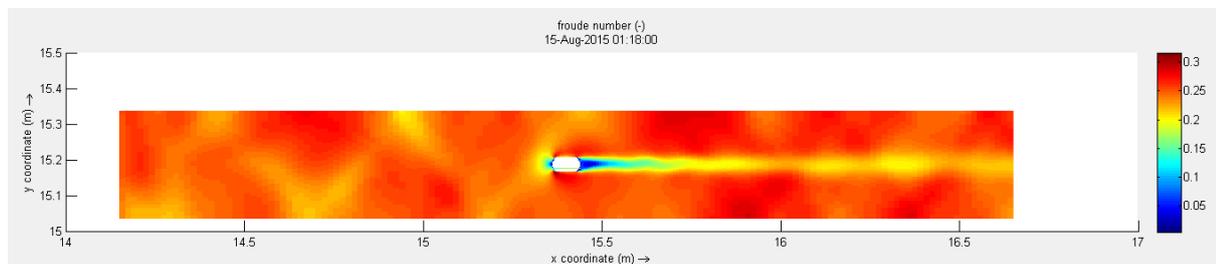


Figura 5.40 - Número de *Froude* do escoamento após 1 hora e 18 minutos

Quanto á vorticidade do escoamento constata-se novo aumento da mesma apos 1 hora e 18 minutos, aumentando a mesma para valores na ordem dos  $100 \text{ s}^{-1}$  como se pode verificar na figura 5.43.

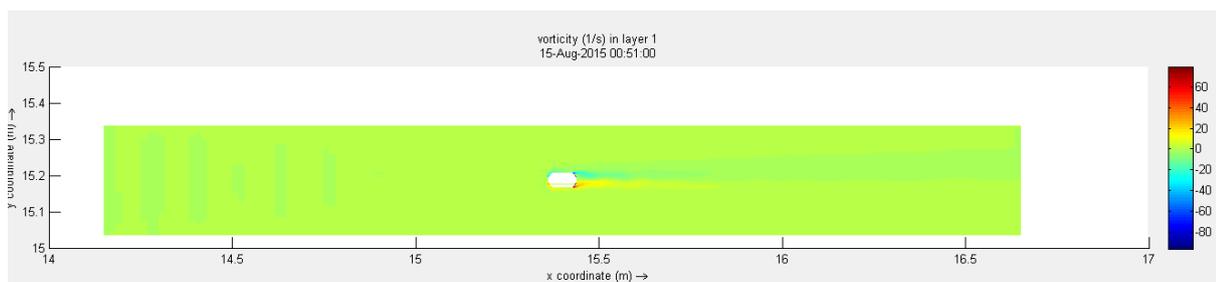


Figura 5.41 - Vorticidade do escoamento após 51 minutos

Tal como verificado, com a introdução de ranhuras surgem novas zonas de vorticidade, uma para cada ranhura introduzida. Apesar de ser possível verificar que existe um incremento na vorticidade do escoamento, quando avaliada a vorticidade que surge na face de montante do pilar, com a introdução de ranhuras, pode-se verificar que a adoção de duas ranhuras ao invés de uma única central, leva a que a vorticidade registada nessa zona seja mais reduzida. O padrão dos vórtices é apresentado nas figuras 5.41 a 5.44, para instantes e tempo representativos.

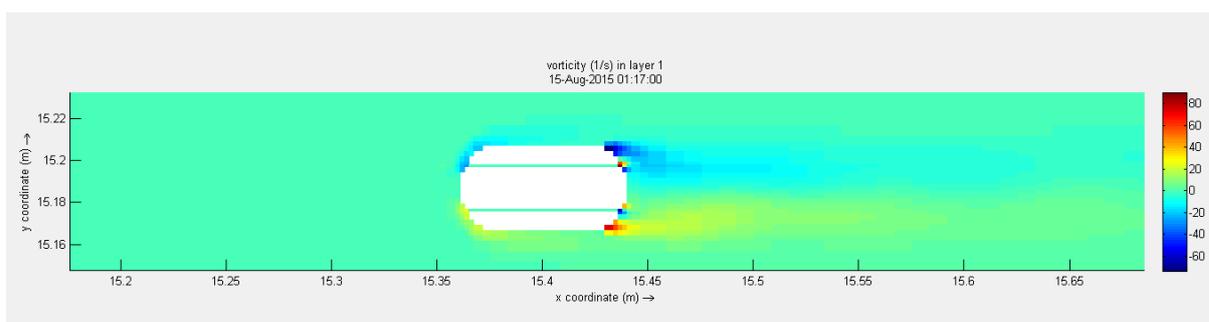


Figura 5.42 - Pormenor da vorticidade na proximidade do pilar após 1 hora e 17 minutos

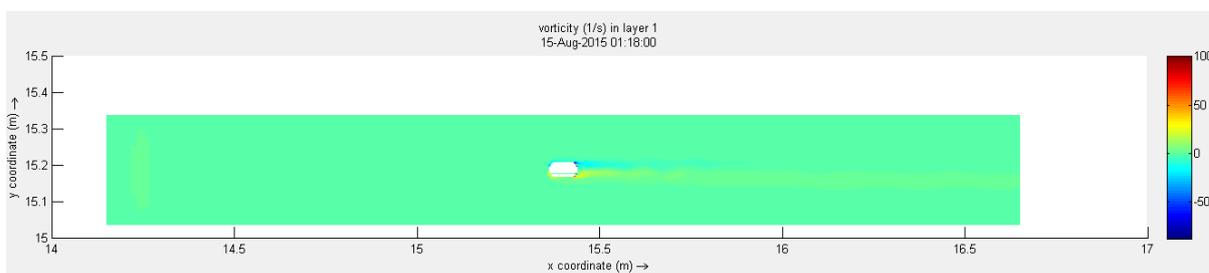


Figura 5.43 - Vorticidade do escoamento após 1 hora e 18 minutos

Facilmente se verifica que ocorre um crescimento e desprendimento de vórtices no pilar sendo que a zona de vorticidade que surge na parte a jusante da ranhura quase se une com a vorticidade formada nos cantos do pilar.

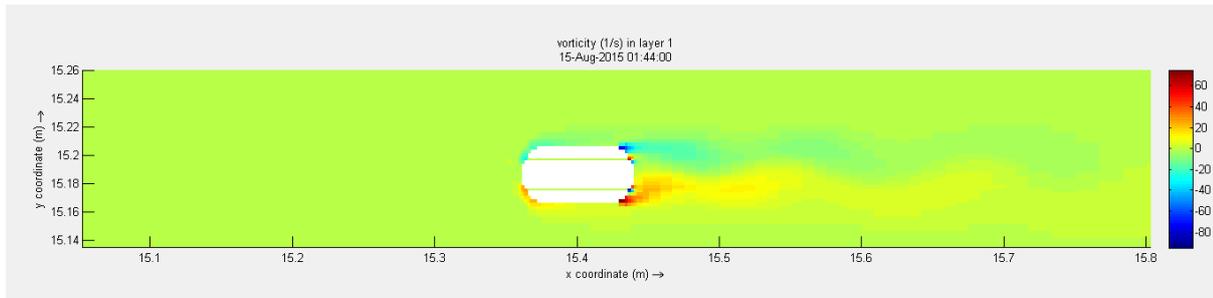


Figura 5.44 - Vorticidade do escoamento após 1 hora 44 minutos

### 5.5.2 Variação da superfície livre

Tal como já se pode constatar com a simulação 3, mesmo na presença de ranhuras ocorre uma sobre elevação da superfície livre com o aproximar da face de montante do pilar. Apesar das ranhuras se situarem numa zona mais lateral do pilar, verifica-se que tal como no caso de apenas existir uma ranhura central, na zona assinalada pela circunferência preta não se verifica qualquer elevação da superfície livre, sendo apontada a introdução das ranhuras como a principal responsável por esta situação.

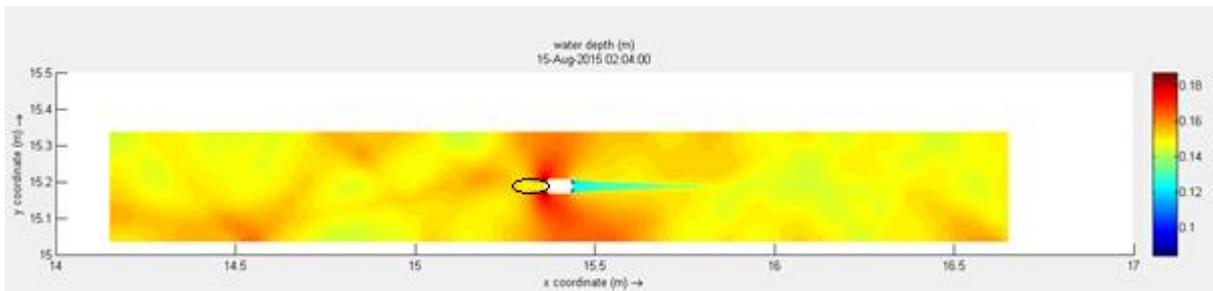


Figura 5.45 - Variação da profundidade

Quanto à gama de valores registados, pode-se constatar que os mesmos se mantêm dentro dos valores obtidos nas anteriores simulações apresentadas.

### 5.5.3 Comportamento dos sedimentos

A introdução de duas ranhuras laterais, não produz grandes alterações face à situação com uma única ranhura. Verificou-se novamente a ausência de erosão na zona frontal do pilar, e a sua ocorrência de forma mais significativa na região lateral do pilar. Constata-se ainda que a zona onde ocorre sedimentação é similar à identificada na simulação 3. Estes detalhes podem ser observados nas figuras 5.46 a 5.49.

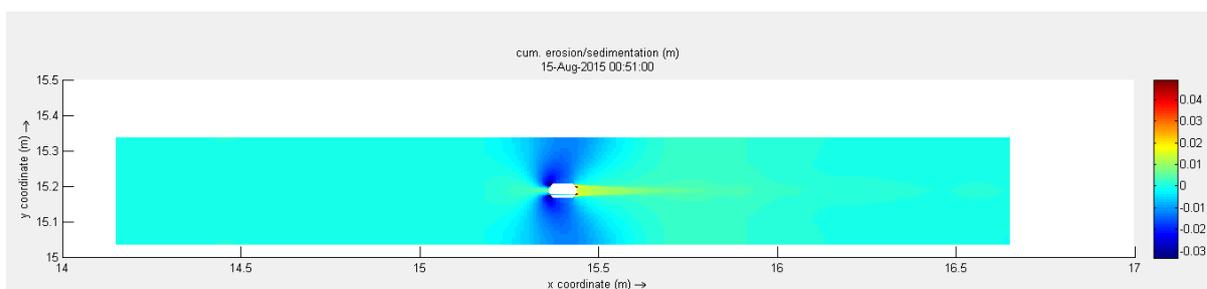


Figura 5.46 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 51 minutos

Tal como o verificado na simulação 3, a zona onde ocorre maior sedimentação é imediatamente a jusante das ranhuras introduzidas no pilar.

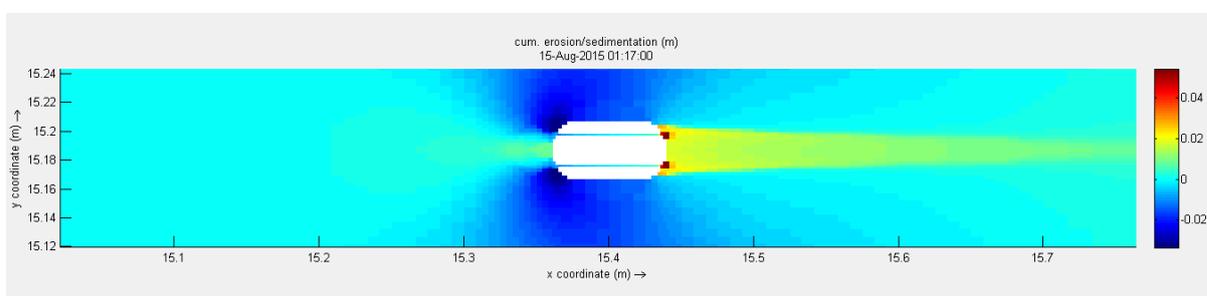


Figura 5.47 - Pormenor da sedimentação/erosão no pilar após 1 hora e 17 minutos

Tal como se pode verificar, da análise da figura 5.46, é possível constatar que existe uma ligeira diminuição dos valores da erosão, sendo que os valores ao nível da sedimentação se mantiveram ao nível dos verificados na simulação 3.

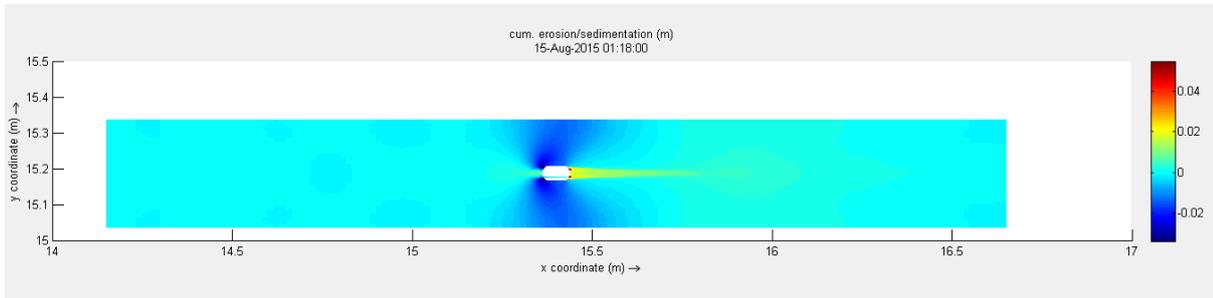


Figura 5.48 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 18 minutos

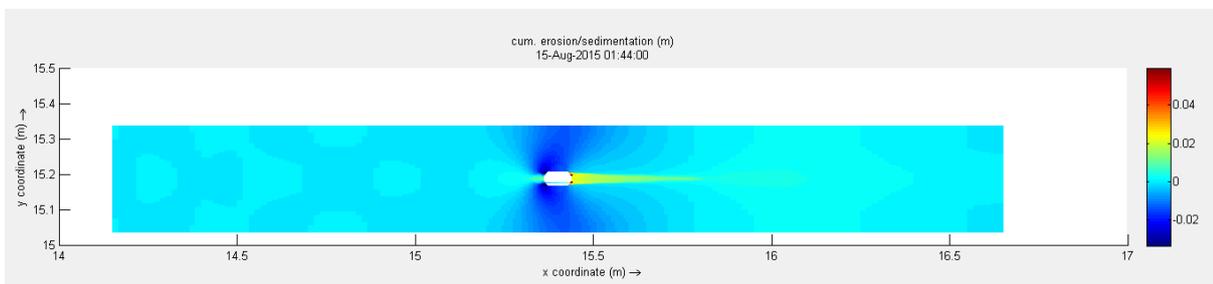


Figura 5.49 - Zonas de sedimentação/erosão instantânea no canal após 1 hora e 44 minutos

A cavidade de erosão, tal como se pode verificar nas figuras 5.48 e 5.49 vai aumentar com o decorrer da simulação.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1 Aspetos gerais e conclusões

Nesta dissertação foi realizada a modelação numérica do escoamento em torno de um pilar isolado, apresentando diferentes configurações para o mesmo, avaliando deste modo o impacto que a configuração do pilar tem no comportamento hidrodinâmico, bem como a nível morfológico.

Uma primeira simulação teve como objetivo avaliar a qualidade dos resultados numéricos obtidos com o *software*, para isso foi construído um modelo 3D com as mesmas características de um ensaio laboratorial já realizado e comparando os resultados obtidos a nível hidrodinâmico. Da análise dos resultados obtidos foi possível concluir que o programa apresenta uma capacidade de simular algo limitada para o caso pretendido, obtendo resultados um bocado inferiores aos esperados, esta situação pode ser devido a não se ter considerado rugosidade nas paredes laterais do canal, bem como ao modelo utilizado pelo *software*.

A segunda simulação, realizada em 2D, serviu de modo a se possuir uma base de comparação, para as diferentes configurações do pilar, sendo escolhida uma geometria simples. No entanto com esta simulação já foi possível verificar que os resultados obtidos iam de encontro ao esperado, sendo facilmente identificado os vários fenómenos esperados como a libertação dos vórtices de esteira, bem como as zonas de erosão/sedimentação e a elevação da superfície livre com o aproximar do pilar. No entanto, devido a limitações quer a nível da malha utilizada pelo *software*, quer a nível da dimensão dos sedimentos e formulação utilizada pelo *software* no tratamento dos mesmos, a simulação da zona frontal do pilar evidenciou algumas limitações.

Na terceira e quarta simulação, que tal como a segunda foram realizadas em 2D, com a introdução de uma ranhura ou mais ranhuras no pilar foi possível constatar que, ao contrário do esperado, a introdução das ranhuras não viria a afetar muito o processo de erosão/sedimentação. Nestes casos a principal diferença observada foi a ausência de erosão na zona frontal do pilar, não sendo possível concluir se foi derivada da presença da ranhura no pilar, ou se foi efeito da geometria da malha na proximidade do pilar. Com a introdução das ranhuras e face à simulação padrão foi também possível observar que iriam surgir novas zonas de vorticidade a jusante das ranhuras.

Assim, de uma forma geral, é possível concluir que o *software* não se apresenta como uma solução ideal para estudo desta problemática, apresentando resultados satisfatórios essencialmente na zona a montante do pilar, sendo recomendado recorrer a um *software* dotado de outras valências de forma a ser possível a obtenção de resultados mais precisos.

## **6.2 Trabalhos Futuros**

Realizada a dissertação, surge naturalmente a necessidade de dar continuidade ao estudo da problemática. Como tal em trabalhos futuros seria interessante efetuar um estudo de mercado acerca dos vários *softwares* disponíveis para abordar a problemática.

Seria também interessante efetuar, o estudo da problemática, recorrendo para o mesmo um *software* com capacidade de efetuar a modelação numérica recorrendo ao uso de malhas não estruturadas, de forma a ser possível efetuar um contorno mais preciso das diversas configurações, e avaliar a influência do mesmo nos resultados obtidos, e se possível confirmar os resultados obtidos quando se efetua a introdução de ranhuras.

Por fim, seria interessante a realização de um estudo para uma situação real de uma ponte, de forma a verificar a capacidade de simulação de situações à escala real dos *softwares* disponíveis e estudar possíveis alterações que se poderiam efetuar nas configurações dos pilares de forma a diminuir o impacto que os mesmos produzem no escoamento.

---

## Referências

- Abouzeid, G. A., Mohamed, H. I., & Ali, S. M. (2006). 3-D NUMERICAL SIMULATION OF FLOW AND CLEAR WATER. *Tenth International Water Technology Conference*. Alexandria, Egypt.
- Abrunhosa, J. D. (2003). *Simulação de Escoamento Turbulento Complexo com Modelagem Clássica e de Grandes Escalas*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Ajú, A. M. (2014). *Estudo da influência da rugosidade de elementos verticais no comportamento do escoamento – Simulação numérica*. Dissertação de Mestrado, UBI, Covilhã.
- Anderson, J. (1995). *Computational Fluid Dynamics – The Basics with Applications*. Maryland: McGraw-Hill.
- Aranda, R. A. (2010). *Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas*. Tese de Mestrado Integrado, FEUP.
- Azevedo, A. (2014). *Estudos preliminares sobre ejeccao de vórtices em torno de um Cilindro no Regime Turbulento com Separação Laminar*. Tese de Mestrado Integrado, 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 do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho.
- Azevedo, M. L., Leite, F. C., & Lima, M. C. (2014). Experimental Study of Scour around Circular and Elongated Bridge Piers. *V Conferência Nacional de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia MEFTE 2014, 11-12 Setembro*. Porto, Portugal.
- Blasek, J. (2001). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Elsevier, Amesterdão.
- Bortoli, Á. L. (2000). *Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional*. Ed. Universidade/UFRGS, Porto Alegre.

- Breusers, H., & Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Cardoso, A. H. (1998). Erosões localizadas junto de esporões fluviais e de encontros e pilares de pontes. *Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, texto de apoio didático, IST, Lisboa*.
- Couto, L. T., & Cardoso, A. H. (2001). Erosões Localizadas Junto de Encontros e Pilares de Pontes. *Parte I - Caracterização da situação de referência, Recursos Hídricos, 22(1)*, 65-74.
- Esmaeili, T., Dehghani, A. A., Zahiri, A. R., & Suzuki, K. (2009). 3D Numerical Simulation of Scouring Around Bridge Piers (Case Study: Bridge 524 crosses the Tanana River). *World Academy of Science. Engineering and Technology* 58.
- Fael, C. M. (2007). Erosões Localizadas junto de Encontros de Pontes e Respetivas Medidas de Proteção. *Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior*.
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd Edition*. Springer, Berlim.
- Gonçalves, N. (2007). *Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto.
- Hill, D. F., & Younkin, B. D. (2006). PIV measurements of flow in and around scour holes. *Experiments in Fluids* 41(2), 295-307.
- Keylock, C. J., Constantinescu, G., & Hardy, R. J. (2012). *The application of computacional*. Journal homepage Geomorphology.
- Khosronejad, A., Kang, S., & Sotiropoulos, F. (2012). Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers. *Advances in Water Resources* 37, 73–85.
- Kolmogorov, A. N. (1942). *Equations of turbulence motion of an incompressible fluid*. Akad. Nauk USSR, Ser. Phys., (transl. into English by D. B. Spalding as Imperial College, Mech. Eng. Dept. Report ON/6, 1968), Vol. 6.

- Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Comp. Meth. Appl. Mech. Energy*, Vol. 3, 269-289.
- Leite, E. P. (2010). *Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes*. Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho.
- Leite, F. L. (2013). *Estudo experimental do efeito de ranhuras na erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes circulares e alongados*. Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho.
- Lima, M. M. (11-12 de Setembro de 2014). Shallow Water Flow around an Elongated Bridge Pier. *V Conferência Nacional de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia MEFTE 2014*. Porto, Portugal.
- Martinez, D. M. (2006). *Transição à Turbulência na Camada de Mistura Estavelmente Estratificada utilizando Simulação Numérica Direta e Simulação de Grandes Escalas*. Tese de doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre.
- Melville, B. W., & Chier, Y. M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(1) - Jan, 59-65.
- Menter, F. R. (1992). *Improved two-equation  $k-\omega$  turbulence model for aerodynamic flows*. NASATM-103975, pp.1-18.
- Pereira, I. (2010). *Escoamento Turbulento em Torno de um Cilindro a Baixo Número de Reynolds*. Porto: Dissertação do MIEM, FEUP.
- Pinto, L. C. (2008). *Análise por Simulação Numérica do Desprendimento de Vórtices de um Cilindro Circular em Movimento Forçado*. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

- Piomelli, U. (2004). *Large-eddy and direct simulation of turbulent flows. Lectures series on Introduction to Turbulence Modeling*. von Karman Institute for Fluid Dynamics.
- Prandtl, L., & Tietjens, O. G. (1957). *Applied Hydro and Aeromechanics*. 2nd ed. New York: Dover Publications.
- Quintela, A. (2000). *Hidráulica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Ramos, P. (2012). *Modelação numérica do escoamento em torno de um pilar*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.
- Richardson, E. V., & Davies, S. R. (2001). Evaluating Scour at Bridges. *US Department of Transportation*. HEC 18, FHWA-NHI-01-001.
- Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsoe, J., & Michelsen, J. (2005). Numerical and experimental investigation. *Journal of Fluid Mechanics* 354, 351-401.
- Saffman, P. G. (1970). *A model for inhomogeneous turbulent flow*. Proc. R. Soc., Lond. A 317, Vol. 317, pp. 417–433.
- Saffman, P. G., & Wilcox, D. C. (1974). *turbulence-model predictions for turbulent boundary layers*. AIAA Journal, Vol. 12.
- Simoons, E. (2012). *Edge scour around an offshore wind turbine*. MSc thesis, Delft University of Technology.
- Sumer, B. M., & Fredsoe, J. (1997). Hydrodynamics around Cylindrical Structures. *World Scientific Publishing, London*.
- Tennekes, H., & Lumley, J. L. (1972). *A First Course in Turbulence*. MIT Press, Massachusetts.
- Wendt, J. F. (2009). *Computational Fluid Dynamics*. Springer, Berlin.
- White, F. (2006). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Companies; 6th edition.
- Zhao, M., Cheng, L., & Zang, Z. (2010). *Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents*. Coastal Engineering, 57(8), 709-721.

**Recursos na internet:**

Estradas de Portugal, 2012. <http://www.estradasdeportugal.pt> [online]

Available at:

<http://www.estradasdeportugal.pt/index.php/pt/informacoes/empreendimentos-em-destaque/25-ponte-de-penacova-sobre-o-rio-mondego->

[Acedido em 23 Fevereiro 2015]



## **ANEXOS**



## Anexo 1 – Construção da Simulação 1

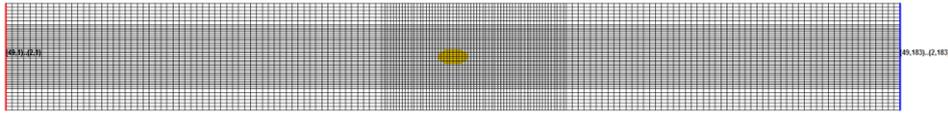


Figura A 1.1 – Grelha com representação do pilar utilizada na simulação 1 e 2

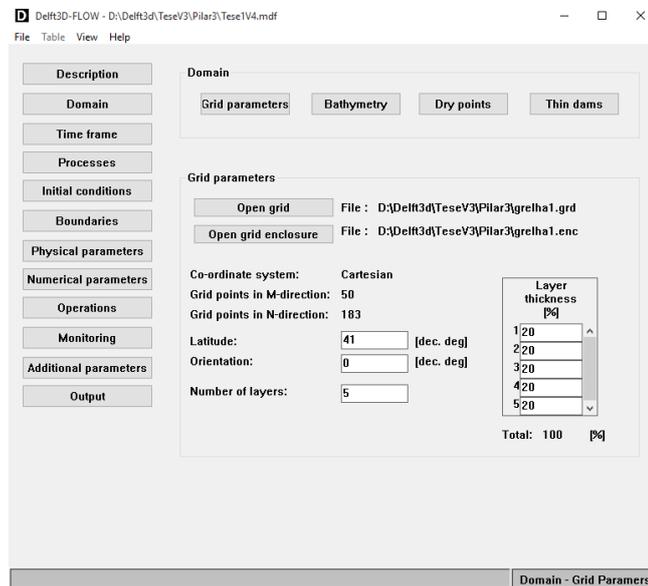


Figura A 1.2 – Submenu *Grid parameters*

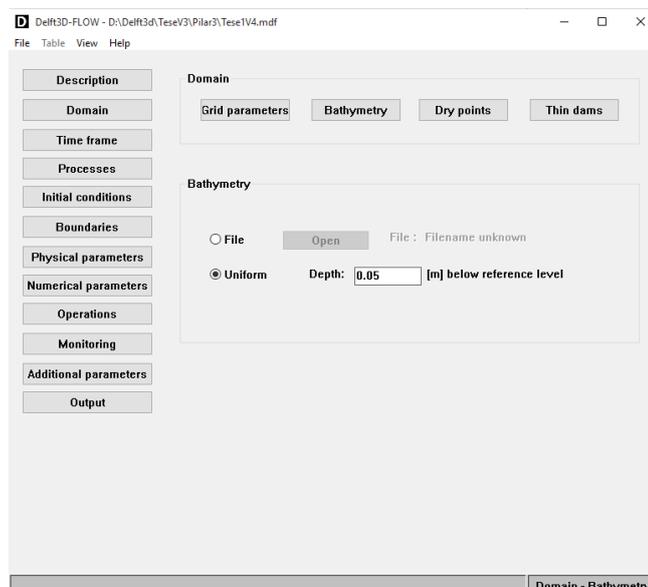


Figura A 1.3 – Submenu *Bathymetry*

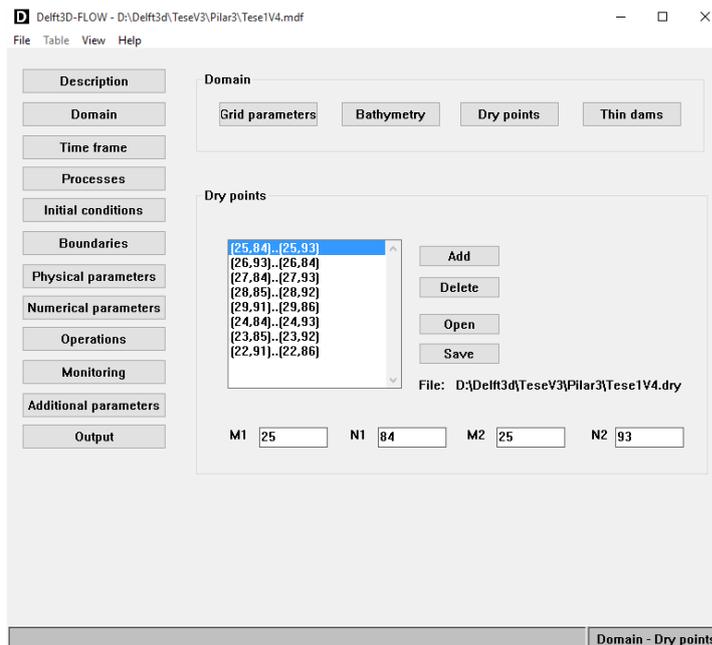


Figura A 1.4 – Submenu *Dry points*

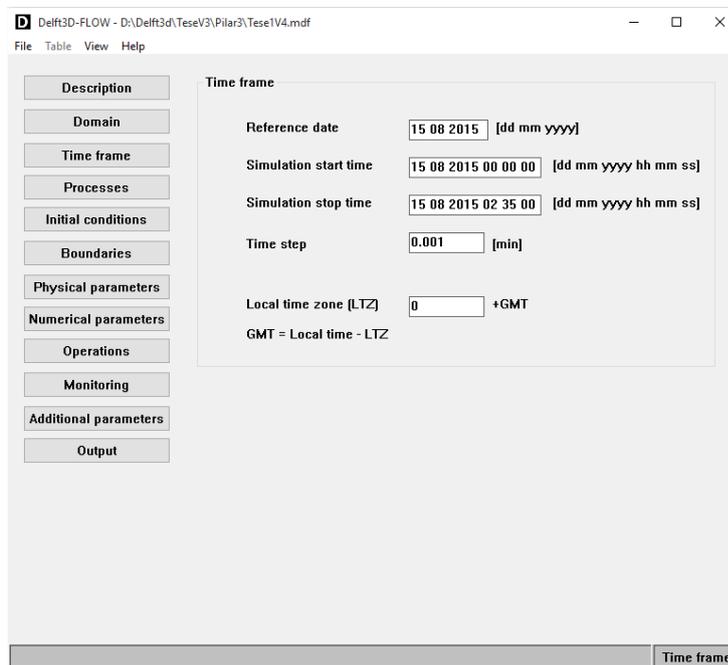
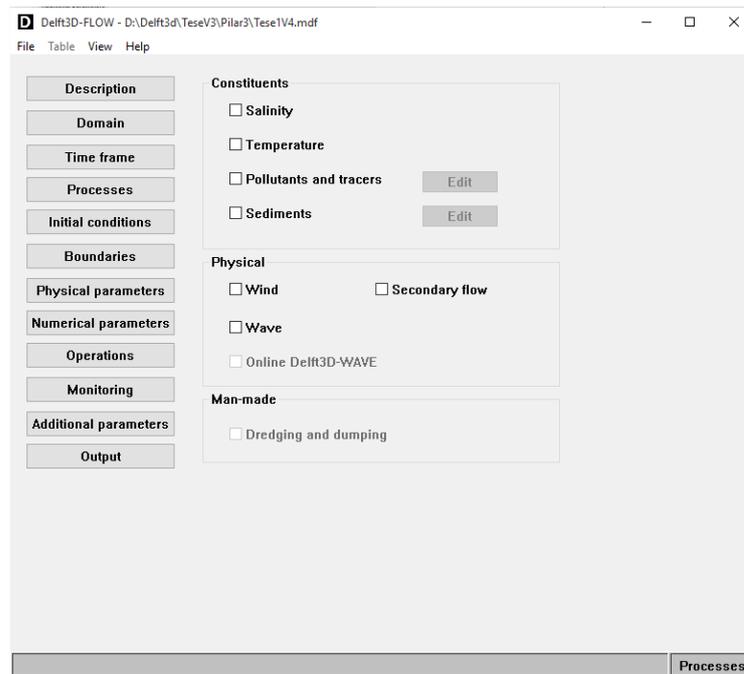
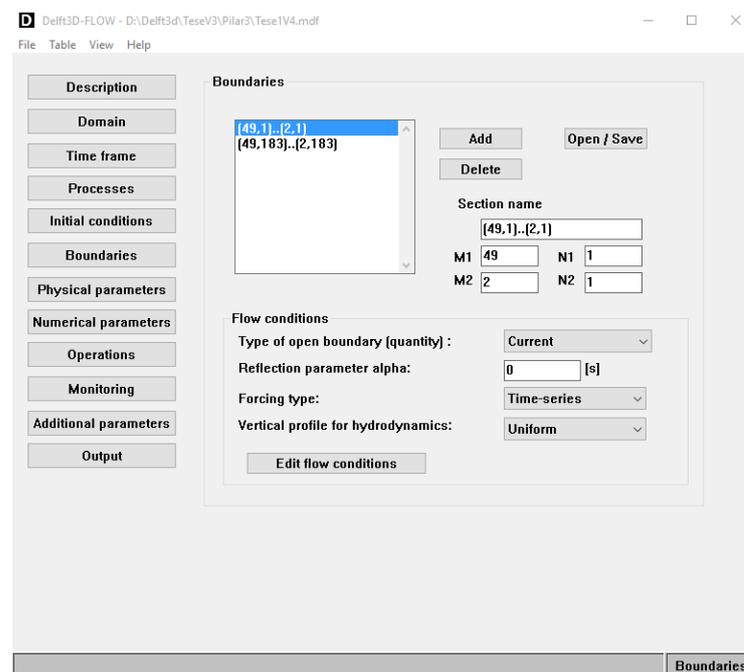


Figura A 1.5 – Submenu *Time frame*

Figura A 1.6 – Submenu *Processes*Figura A 1.7 – Submenu *Boundaries*

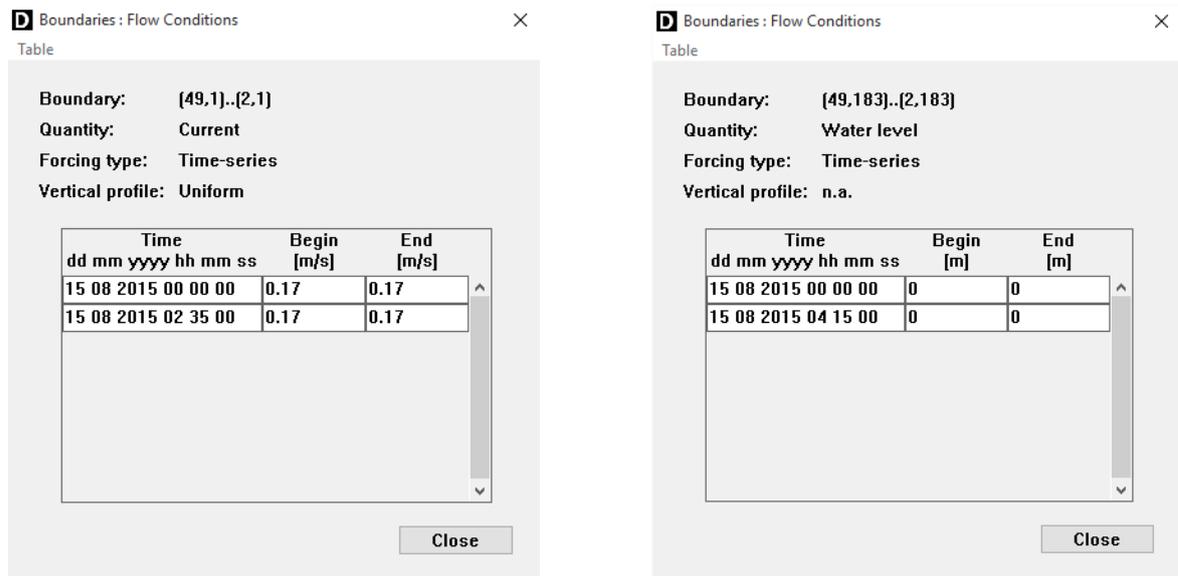


Figura A 1.8 – Condições impostas nas fronteiras do canal

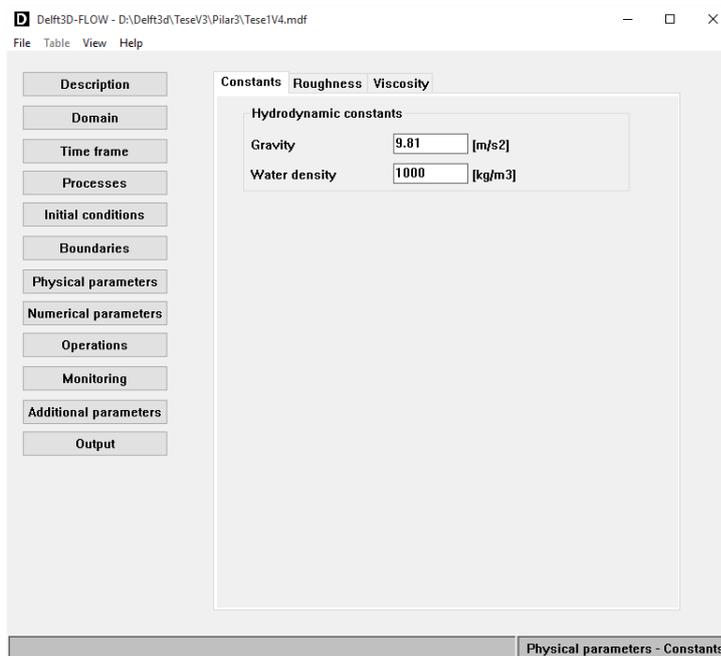
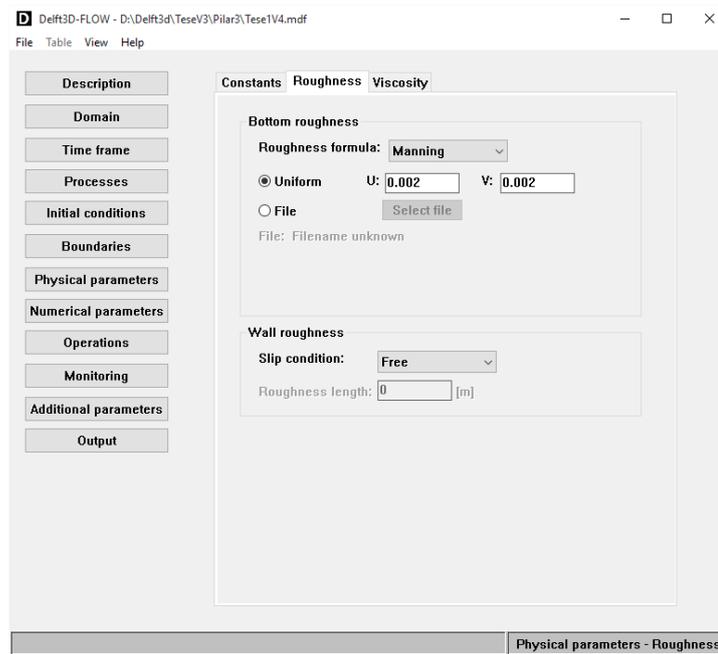
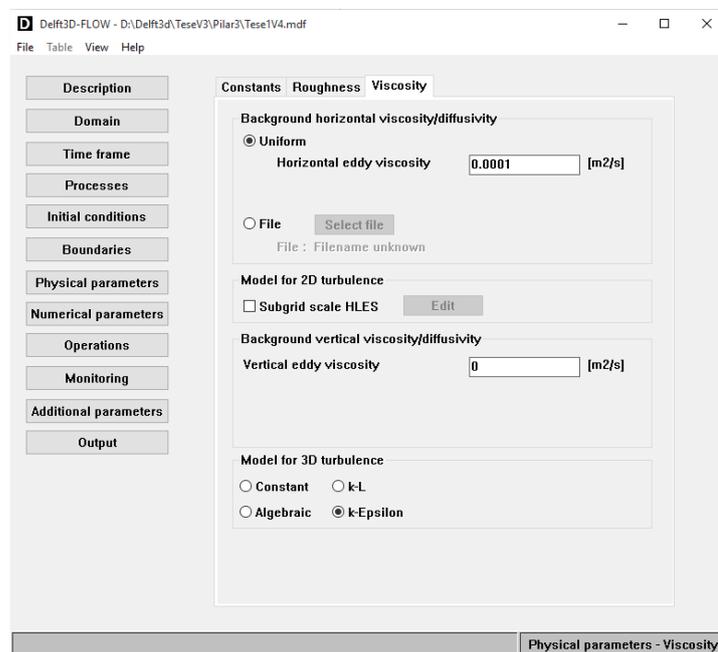
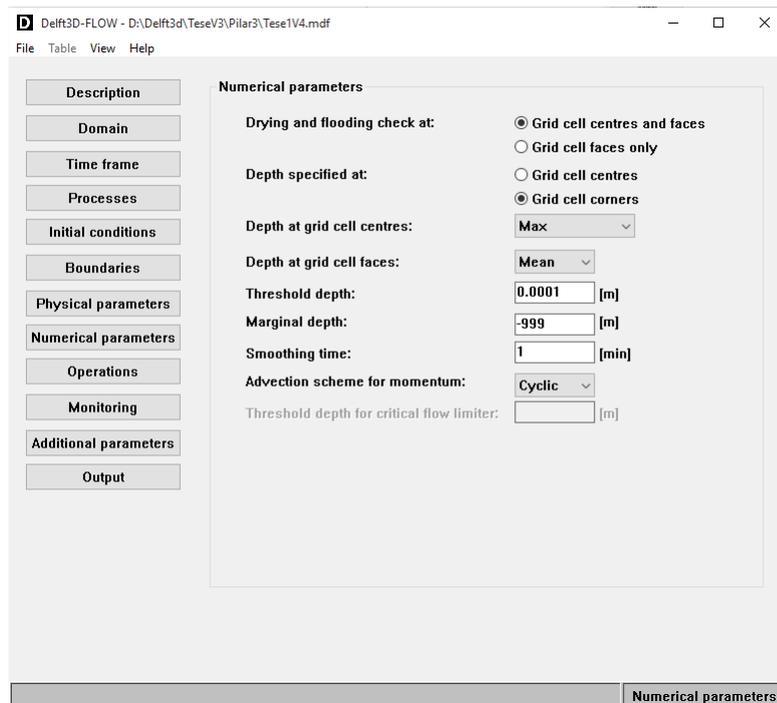


Figura A 1.9 – Submenu *Constants*

Figura A 1.10 – Submenu *Roughness*Figura A 1.11 – Submenu *Viscosity*

Figura A 1.12 – Submenu *Numerical parameters*

## Anexo 2 – Construção da Simulação 2

Para a construção do caso 2 foi utilizada a mesma grelha da simulação 1 daí a mesma não será mostrada, é importante referir que todos os menus que sejam iguais aos mostrados no Anexo 1 não voltaram a ser mostrados.

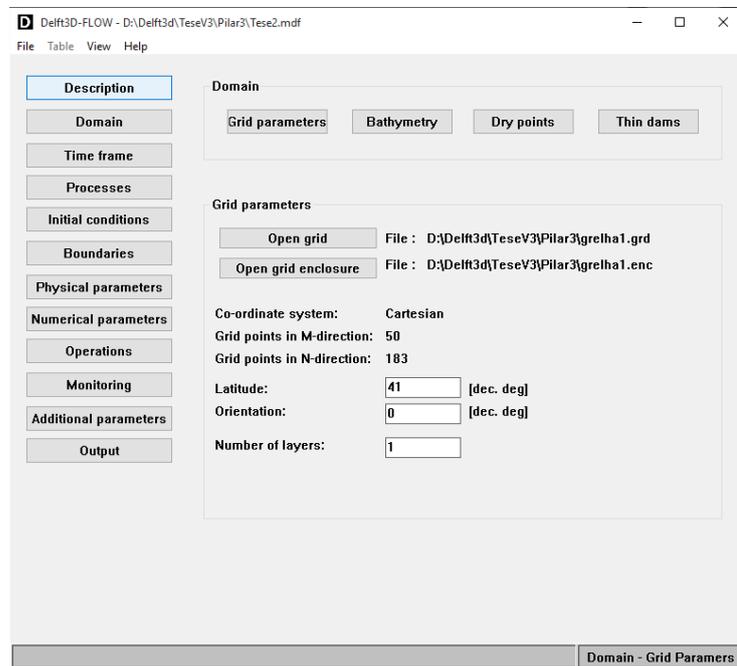


Figura A 2.1 – Submenu *Grid parameters*

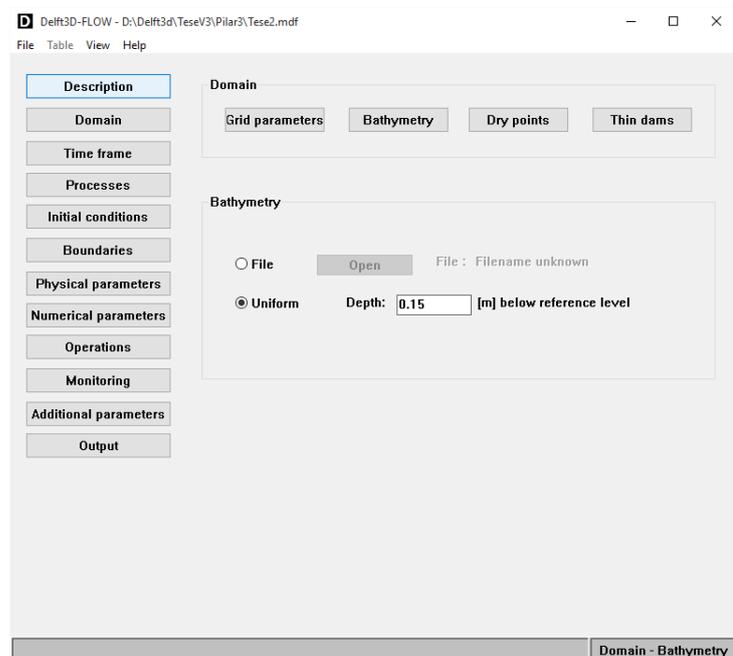


Figura A 2.2 – Submenu *Bathymetry*

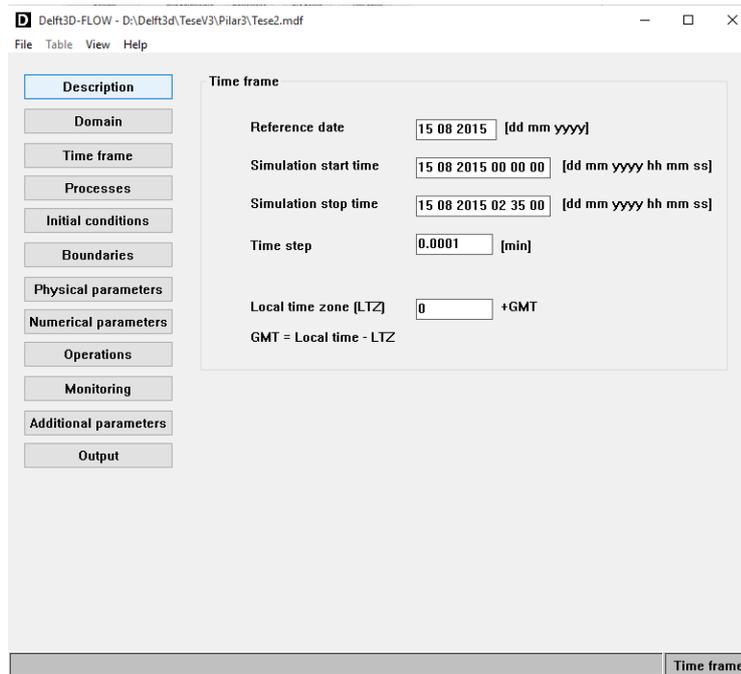


Figura A 2.3 – Submenu *Time frame*

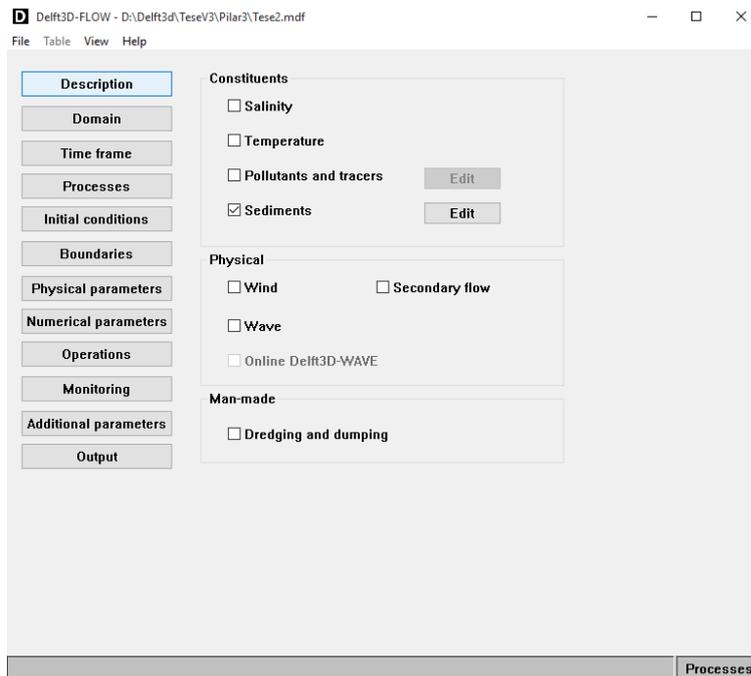


Figura A 2.4 – Submenu *Processes*

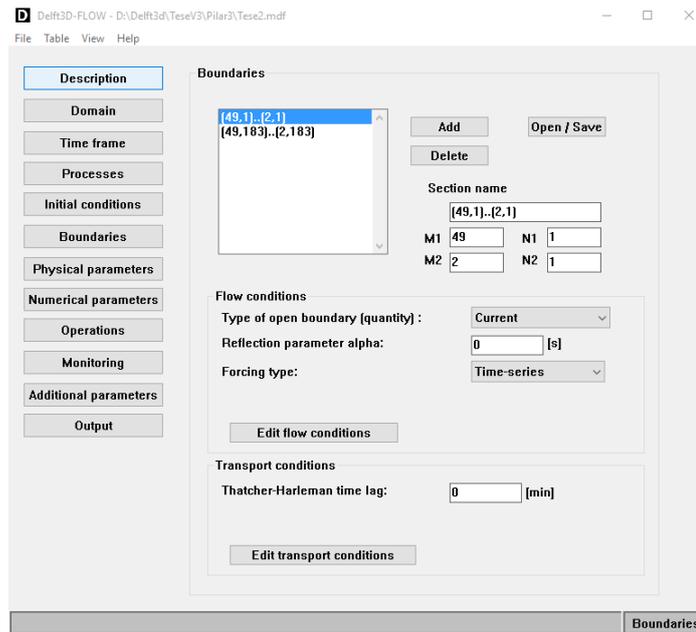


Figura A 2.5 – Submenu *Boundaries*

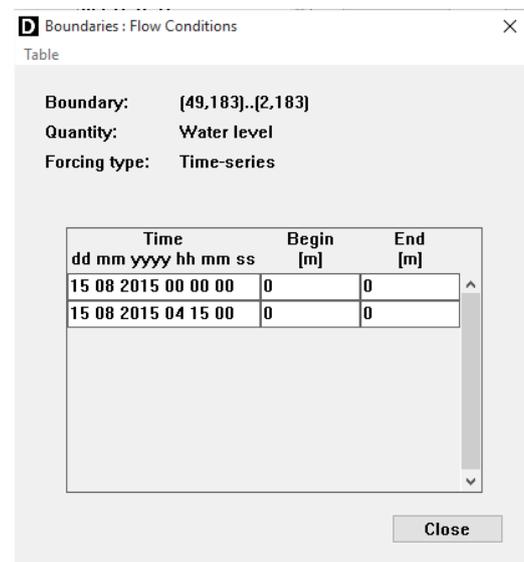
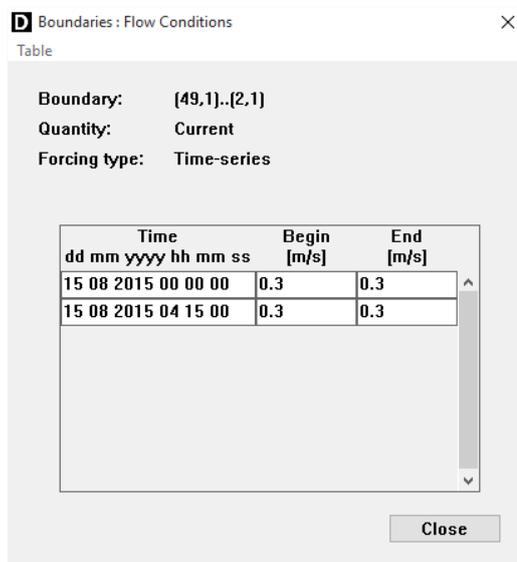


Figura A 2.6 – Condições impostas nas fronteiras do canal

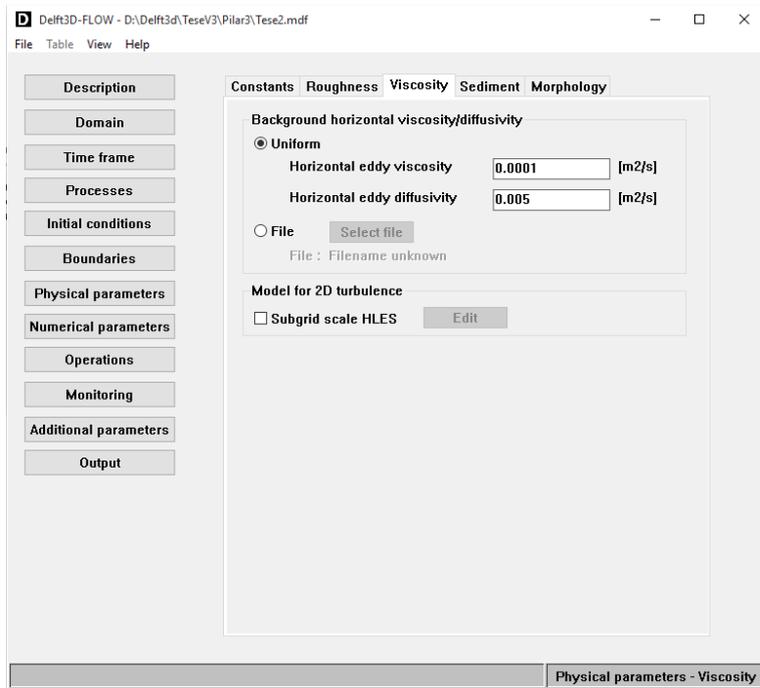


Figura A 2.7 – Submenu *Viscosity*

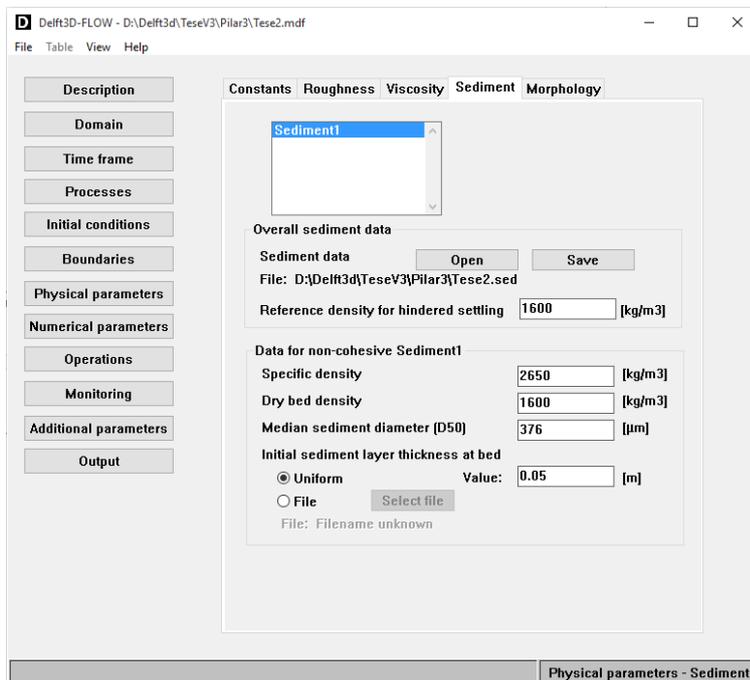


Figura A 2.8 – Submenu *Sediment*

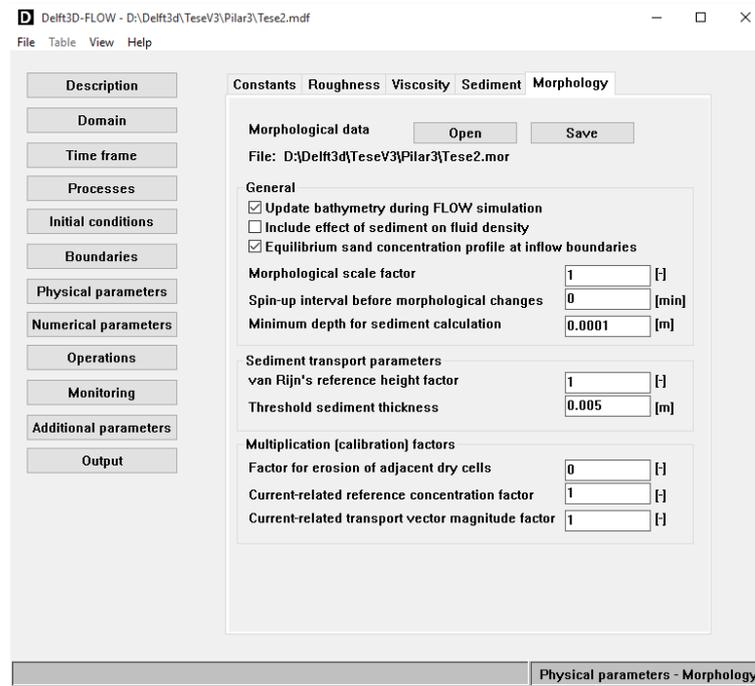


Figura A 2.7 – Submenu *Morphology*

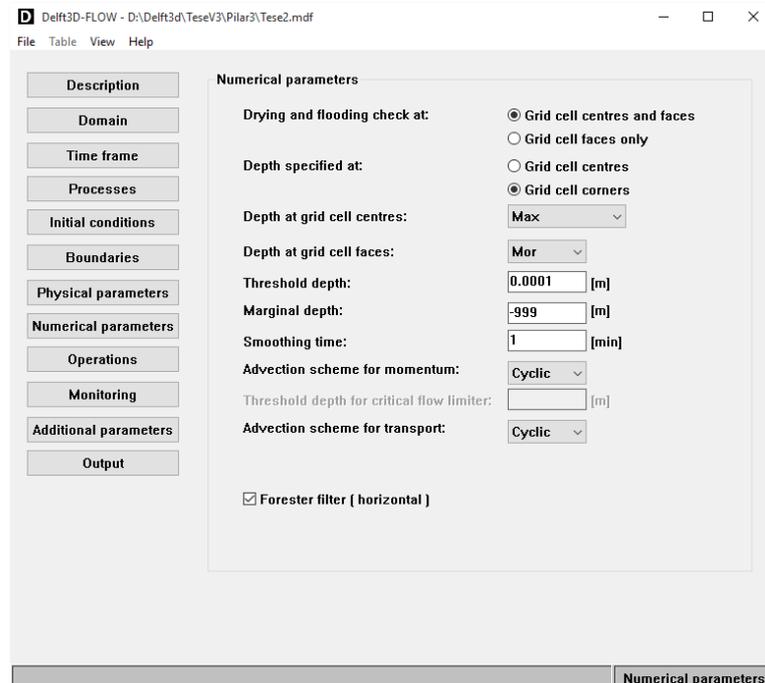


Figura A 2.7 – Submenu *Numerical parameters*



### Anexo 3 – Construção da Simulação 3

Na construção da simulação 3 relativamente à simulação 2 apenas difere a malha utilizada, bem como os pontos que iriam simular o pilar como tal apenas as mesmas serão ilustradas aqui, pois a construção da simulação é em tudo igual ao representado no anexo 2.

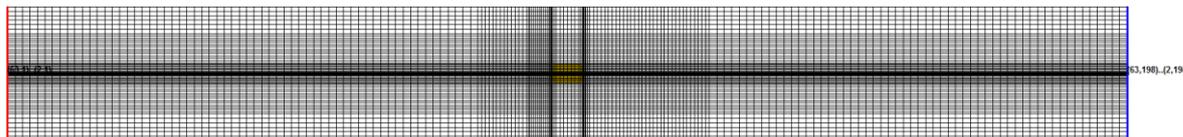


Figura A 3.1 – Grelha com representação do pilar utilizada na simulação 3

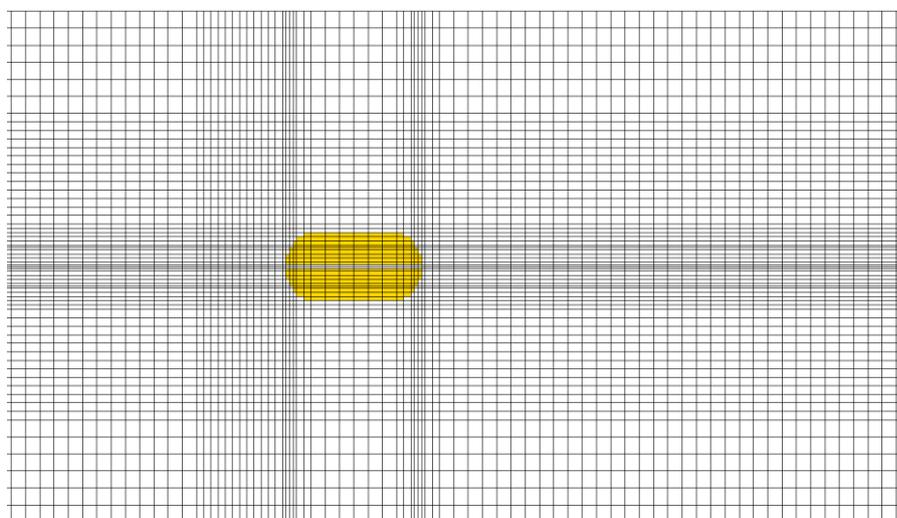


Figura A 3.2 – Pormenor do pilar



#### Anexo 4 – Construção da Simulação 4

Tal como no caso da simulação 3, o que difere para a simulação 2 apenas é a malha utilizada e os pontos que iriam simular o pilar, assim sendo apenas as mesmas serão ilustradas aqui, pois a construção da simulação é em tudo igual ao representado no anexo 2.

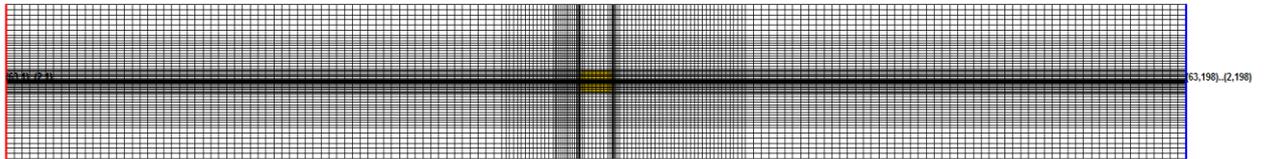


Figura A 4.1 – Grelha com representação do pilar utilizada na simulação 4

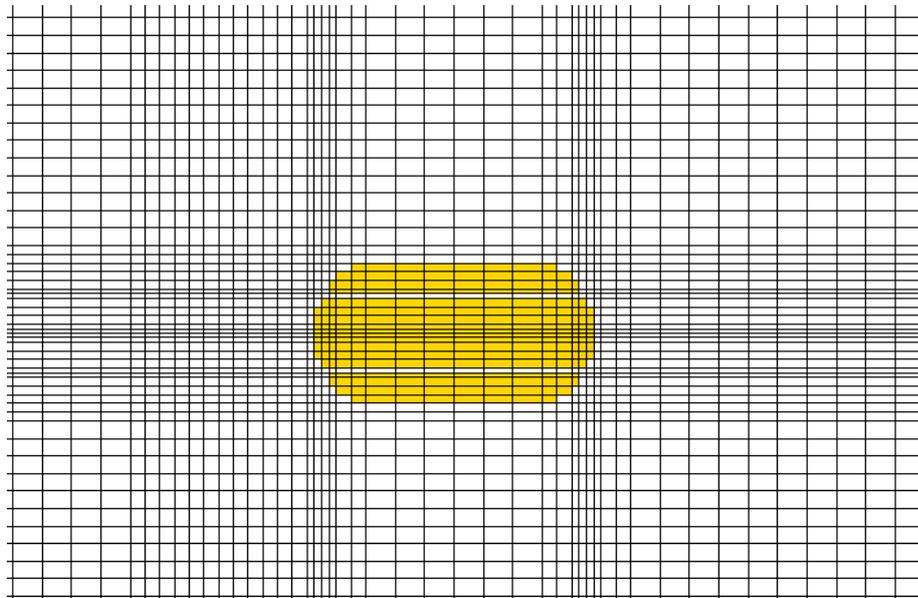


Figura A 4.2 – Pormenor do pilar