



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

**Estudo da influência da forma do esporão no  
campo de escoamento  
Modelação Numérica**

**Hugo Daniel Leitão Canilho**

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

Orientador: Prof. Doutora Cristina Maria Sena Fael

**Covilhã, outubro de 2016**



## Dedicatória

*Dedicado à minha Mãe...*



## Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Cristina Maria Sena Fael, pela oportunidade de realizar este trabalho e por todo o apoio e disponibilidade.

Agradeço aos meus amigos e colegas, em especial ao Tiago Machado, Roberto Marques, Serafim Pinto pela amizade e por todo o apoio que me deram não só no decorrer desta dissertação mas em todo o percurso académico.

Ao João Libério, pelo apoio, colaboração e companheirismo no desenvolver desta dissertação.

Agradeço à minha namorada por nunca me deixar desistir, por sempre me dar apoio quando mais precisava.

E finalmente à minha família, avós, irmã e em especial à minha mãe, sem eles nada seria possível.



## Resumo

A erosão do leito dos rios meandrizados é um fenómeno natural, mas em certas situações existe uma necessidade de evitar esta erosão por levantar problemas em estruturas adjacentes ao rio. A introdução de campos de esporões é uma solução, garantindo uma proteção eficaz nas margens dos rios evitando a sua erosão.

Na realização deste estudo, pretende-se avaliar a influência que a forma de um esporão tem no escoamento, quando introduzido num canal meandrizado com batimetria do leito definida, recorrendo ao uso de programas computacionais de dinâmica de fluidos.

Numa primeira fase foi efetuada a modelação do canal hidráulico, localizado no Laboratório de Hidráulica Fluvial do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior, utilizando o levantamento topográfico para concepção da geometria. Para o efeito, foi utilizado o *software* comercial *Pointwise* para gerar a malha e o *software* comercial *ANSYS Fluent* para realizar a simulação. Foram utilizados quatro modelos de turbulência para a validação do modelo numérico, comparando os resultados obtidos por cada um deles com os resultados obtidos experimentalmente. Dos modelos utilizados, o modelo  $k-\omega$  foi o que melhor se aproximou dos resultados experimentais. Deste modelo foram retirados valores dos campos de velocidade longitudinal e transversal e também, tensões de corte nas paredes em diversas secções do canal.

Seguidamente, procedeu-se à introdução de esporões no extradorso da secção de entrada da segunda curva. Foram efetuadas cinco simulações com esporões, fazendo variar a forma e o ângulo com o escoamento. No primeiro caso testado, o esporão apresenta uma forma padrão, com ângulo normal ao escoamento. Nas duas seguintes fez-se variar o ângulo com o escoamento, 45° e 135°. Na quarta, o esporão inserido era de forma  $L$ , normal ao escoamento. Na quinta e última, o esporão tomou a forma de  $T$ , também ele normal ao escoamento.

Analisando os casos com esporões, existe um padrão nos resultados obtidos no que diz respeito à magnitude das velocidades, tendo de forma geral aumentado no intradorso e diminuído no extradorso da curva. De um modo geral, o caso do esporão com ângulo de 45° foi aquele que obteve melhores resultados, não agravando tanto como os outros casos, a velocidade na zona interna da curva ao mesmo tempo que diminuiu a velocidade na zona exterior. Também neste caso, as tensões de corte do fundo do canal foram as que registaram valores mais baixos.

## Palavras-chave

Simulação numérica, CFD, Escoamento Turbulento, Esporão, Canal Meandrizado.



## Abstract

The erosion of meandering river bed is a natural phenomenon, but in certain cases, there is a need to prevent this erosion because it can cause problems to adjacent structures. The introduction of spur dikes is a solution, ensuring effective protection on the banks of rivers avoiding erosion.

In the development of this study, it is intended to evaluate the influence that the shape of a spur dike has in the flow, when inserted into a meandering channel with developed bathymetry, using Computational Fluid Dynamics software.

Initially, the modeling of the flume, located in the Fluvial Hydraulics Laboratory of the Department of Civil Engineering and Architecture of the University of Beira Interior, was performed, using the topographic data. For this purpose, commercial software *Pointwise* was used to do the mesh generation and *ANSYS Fluent* to perform the numerical simulation. Four turbulence models were used to validate the model and its results were compared to experimental data. From all the turbulence models employed to solve the numerical cases, the  $k-\omega$  turbulence model was the one that had closer data to the experimental one. Due to the use of this model, values from longitudinal and transverse velocities, as well as shear stress values were obtained, for different channel sections.

Thereafter, spur dikes were inserted in the exterior zone of the inlet section from the second bend of the channel. Then five simulations with spur dikes in the channel, changing its shape and angle, were made, where in the first, the spur dike had a standard shape with a 90 degree angle with the flow field. In the following two cases, changes were made to the angles, 45 and 135 degrees for the second and third simulations respectively. In the fourth simulation, an *L* shape spur dike was inserted in the channel, with 90 degree angle with the flow field. In the fifth and the last simulation, the spur had a *T* shape, as well perpendicular to the flow field.

By analyzing the spur dike cases, there is a pattern in the results regarding the velocity magnitude, having increased on the inside of the bend and decreased on the outer zone for all the cases. In general, the second simulation (45 degree case) was the one that shown better results, by not aggravating, as much as the other cases, the speed of the flow in the inner area of the bend, while at the same time reducing the speed of the flow on the outer zone. Also in this case, for the shear stress of the channel bottom, lower values were obtained.

## Keywords

Numerical Simulation, CFD, Turbulent Flow, Spur Dike, Meandering Channel.



# Índice geral

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento geral . . . . .	1
1.2	Organização da dissertação . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Dinâmica de Fluidos Computacional</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução . . . . .	5
2.2	Equações governativas . . . . .	6
2.2.1	Conservação da massa . . . . .	6
2.2.2	Quantidade de movimento . . . . .	6
2.3	Variáveis características de escoamento turbulento . . . . .	7
2.4	Modelos de discretização . . . . .	8
2.4.1	Método dos Volumes Finitos . . . . .	8
2.4.2	Método de resolução - " <i>Pressure-Based</i> " . . . . .	8
2.5	Modelos de resolução numérica . . . . .	10
2.5.1	Modelo Spalart-Allmaras . . . . .	11
2.5.2	Modelo k- $\epsilon$ RNG . . . . .	12
2.5.3	Modelo k- $\omega$ . . . . .	13
2.5.4	Modelo k- $\omega$ SST . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Validação do modelo computacional</b>	<b>15</b>
3.1	Introdução . . . . .	15
3.2	Modelo experimental . . . . .	15
3.3	Metodologia para execução de um modelo computacional . . . . .	18
3.4	Modelo computacional . . . . .	20
3.4.1	Malha . . . . .	21
3.4.2	Modelo de turbulência . . . . .	23
3.4.3	Velocidade Longitudinal . . . . .	24
3.4.4	Velocidade em secção transversal . . . . .	25
3.4.5	Tensões de corte . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Análise computacional na presença de esporões</b>	<b>29</b>
4.1	Introdução . . . . .	29
4.2	Simulação 1 - Esporão padrão . . . . .	29
4.2.1	Campo de velocidades . . . . .	31
4.2.2	Tensões de corte . . . . .	32
4.3	Simulação 2 - Esporão com orientação de 45° . . . . .	33
4.3.1	Campo de velocidades . . . . .	33
4.3.2	Tensões de corte . . . . .	34
4.4	Simulação 3 - Esporão com orientação de 135° . . . . .	35
4.4.1	Campo de velocidades . . . . .	35
4.4.2	Tensões de corte . . . . .	36
4.5	Simulação 4 - Esporão em forma de L . . . . .	37
4.5.1	Campo de velocidades . . . . .	37
4.5.2	Tensões de corte . . . . .	38

4.6	Simulação 5 - Esporão em forma de T . . . . .	39
4.6.1	Campo de velocidades . . . . .	39
4.6.2	Tensões de corte . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Conclusões e sugestões para trabalhos futuros</b>	<b>43</b>
5.1	Conclusões . . . . .	43
5.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	44
	<b>Bibliografia</b>	<b>45</b>

## Lista de Figuras

1.1	Evolução da geometria do rio . . . . .	1
1.2	A ameaça de um rio meandrizado à ponte e a estrada a ele adjacente . . . . .	2
1.3	Classificação de esporões . . . . .	3
2.1	Modelação do descarregador de uma barragem . . . . .	5
2.2	Fluxograma do método numérico "Pressure-based" . . . . .	10
3.1	Esquema do modelo experimental em planta . . . . .	16
3.2	Área de estudo e secções a serem analisadas . . . . .	16
3.3	Secções transversais antes do início do caso experimental: (a) Secção 9C; (b) Secção C . . . . .	16
3.4	Foto do canal . . . . .	17
3.5	Geometria obtida pelo levantamento efetuado na estação Total Leica M550 . . . . .	18
3.6	Geometria de fundo da curva em estudo . . . . .	21
3.7	Perfil de velocidades para as varias malhas: (a) Velocidade longitudinal; (b) Velocidade transversal; (c) Velocidade vertical; . . . . .	22
3.8	Perfil de velocidades para os varios modelos: (a) Velocidade longitudinal; (b) Velocidade transversal; (c) Velocidade vertical; . . . . .	23
3.9	Velocidade do escoamento nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm; . . . . .	24
3.10	Esquema do escoamento em 3D num canal em curva . . . . .	25
3.11	(a) Fluxo secundário na secção central da simulação do canal; (b) Fluxo secundário registado experimentalmente . . . . .	26
3.12	Fluxo secundário nas secções: (a) Entrada "9C"; (b) Intermédia "11D"; (c) Intermédia "16"; (d) Saída "18A" . . . . .	27
3.13	Tensão de corte nas paredes e fundo do canal na curva em estudo . . . . .	28
4.1	Localização do esporão no canal para a simulação 1 juntamente com a batimetria do leito . . . . .	30
4.2	Estrutura do escoamento na presença de um obstáculo . . . . .	30
4.3	Velocidade do escoamento com esporão padrão, nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm; . . . . .	31
4.4	Tensões de corte nas paredes e fundo do canal na curva com esporão padrão . . . . .	32
4.5	Localização do esporão no canal para a simulação 2 juntamente com a batimetria do leito . . . . .	33
4.6	Velocidade do escoamento com esporão a 45°, nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm . . . . .	34
4.7	Tensões de corte no leito da curva com esporão orientado a montante . . . . .	35
4.8	Localização do esporão no canal para a simulação 3 juntamente com a batimetria do leito . . . . .	35
4.9	Velocidade do escoamento com esporão a 135°, nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm; . . . . .	36
4.10	Tensões de corte no leito da curva com esporão orientado a jusante . . . . .	37

4.11 Localização do esporão no canal para a simulação 4 juntamente com a batimetria do canal . . . . .	37
4.12 Velocidade do escoamento com esporão em forma de L, nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm; . .	38
4.13 Tensões de corte nas paredes e fundo do canal na curva com esporão em forma de L	39
4.14 Localização do esporão no canal para a simulação do esporão T juntamente com a batimetria do leito . . . . .	39
4.15 Velocidade do escoamento com esporão em forma de T, nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm; . .	40
4.16 Tensão de corte nas paredes e fundo do canal na curva com esporão em forma de T	41

## Lista de Tabelas

3.1	Características do escoamento na entrada . . . . .	21
3.2	Resumo de cada malha . . . . .	22



## Siglas e Acrónimos

ADV	<i>Acoustic Doppler Velocimeter</i>
CAD	Desenho Assistido por computador ( <i>Computation Assisted Design</i> )
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacional ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
CVFEM	Volume de Controlo Baseado em Elementos Finitos ( <i>Control-Volume Finite-Element Method</i> )
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
DES	<i>Detached Eddy Simulation</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
RAM	<i>Random-Access Memory</i>
RANS	<i>Reynolds averaged Navier-Stokes</i>
RSM	<i>Reynolds Stress Model</i>
SSD	<i>Solid-State Disk</i>
SST	<i>Shear-stress Transport</i>
UBI	Universidade da Beira Interior



## Simbologia

$b$	Largura do canal
$D$	Diâmetro hidráulico do escoamento
$D_\omega$	Termo de difusão cruzada
$g$	Aceleração da gravidade
$G_b$	Produção de energia cinética turbulenta devido às flutuações
$G_k$	Produção de energia cinética turbulenta
$G_\nu$	Produção da viscosidade turbulenta
$G_\omega$	Produção de taxa de dissipação específica
$I$	Intensidade turbulenta
$k$	Energia cinética turbulenta
$l$	Comprimento característico de turbulência
$R_c$	Raio de curvatura
$Re$	Número de Reynolds do escoamento
$p$	Pressão
$t$	Tempo
$u_i$	Velocidade pontual segundo a direção $i$
$U$	Velocidade média
$u'_i$	Flutuação de velocidade segundo a direção $i$
$u^+$	Velocidade, valor adimensional
$y^+$	Distância, valor adimensional
$\varepsilon$	Taxa de dissipação turbulenta
$\Gamma_k$	Difusividade efetiva da energia inética turbulenta
$\Gamma_\omega$	Difusividade efetiva da taxa de dissipação específica
$\mu$	Coefficiente de viscosidade dinâmica
$\nu_T$	Viscosidade cinemática turbulenta
$\omega$	Taxa de dissipação específica
$\rho$	Massa volúmica
$\tau$	Tensão de corte



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento geral

O mundo como o conhecemos é bastante diferente daquele que existia à milhares de anos. Ao pensar nas alterações que o próprio ser humano sofreu, desde que há registos da existência humana, observa-se claramente uma grande mudança. O mesmo acontece com o meio ambiente e no caso específico do estudo efetuado nesta dissertação, com os rios.

Os rios são autores da sua própria estrutura [1], isto devido ao facto de pelo seu leito, passar água a diferentes velocidades. É inevitável que tanto o leito como as respetivas margens sofram erosão provocando uma alteração na batimetria do leito e também na geometria do próprio rio pois todas as fronteiras do escoamento e não somente a superfície são livres, no sentido que não são fixas ou conhecidas a priori [2]. Esta situação é demonstrada na figura 1.1.

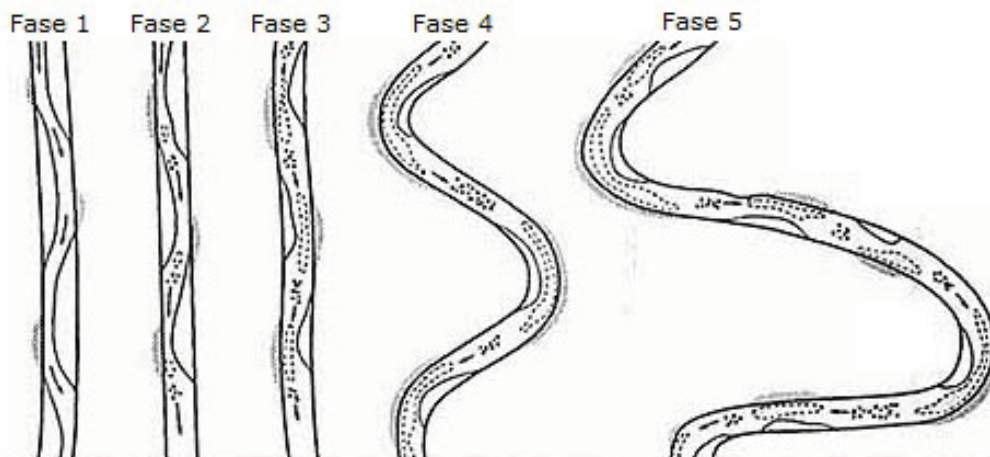


Figura 1.1: Evolução da geometria do rio [3]

Ao observar a figura 1.1 e na eventual existência de uma habitação ou qualquer outra estrutura numa zona junto à margem do rio na fase 3, esta pode ficar parcialmente ou mesmo completamente destruída devido às alterações da geometria do rio. Em alguns casos, este desenvolvimento excessivo dos meandros pode causar danos sérios em estradas adjacentes ao rio. O talude que mantém a estrada, bem como as pontes que permitem o atravessar do rio, podem ficar em risco [4], tal como demonstra a figura 1.2.

Aparentemente, com a criação de um canal artificial em alinhamento recto, que desvie o escoamento para fora do meandro, o problema estaria resolvido. Mas a construção deste canal acarreta vários impactos negativos, como aumento do risco de cheias, a destruição de ecossistemas, o aumento da velocidade de escoamento levando a uma maior erosão dos solos, e ainda,

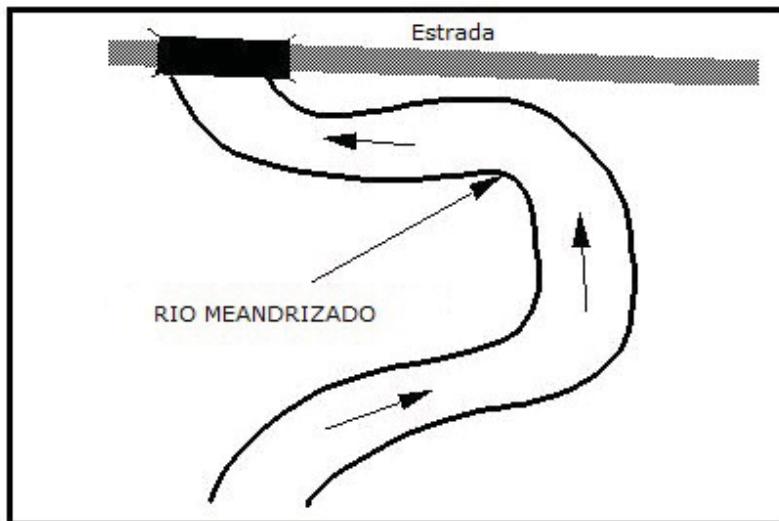


Figura 1.2: A ameaça de um rio meandrizado à ponte e a estrada a ele adjacente [4]

segundo alguns estudos, leva à redução da quantidade de peixes no rio.

De acordo com [5], para o caso deste tipo de canal e no caso de reforço das margens, a energia do rio durante as cheias tende a aumentar e a erosão acelera em outros locais do curso de água. Assim, existe uma necessidade de evitar a erosão excessiva das margens, visto que ao desviar o escoamento para outro local, problemas adicionais vão aparecer. Uma das formas de evitar o problema da erosão é através da introdução de esporões junto às margens do rio.

Um esporão pode ser definido como uma estrutura hidráulica de forma alongada, em que uma extremidade está enraizada de uma margem de um rio e a outra está projetada no curso de água, com finalidade de:

- Alterar o escoamento protegendo assim as margens dos rios da erosão provocada por este mesmo escoamento [6];
- Proteção de outras estruturas como pilares de pontes [7] [8];
- Melhorar as condições de navegabilidade do rio;
- Melhorar o controlo de cheias [9];
- Assegurar o abastecimento de água, quer para consumo, quer para regas agrícolas, mantendo estável a velocidade do escoamento assim como o nível das águas.

Estas são os principais desígnios da introdução de esporões em cursos de água, todavia nos últimos anos também os impactos estéticos e ambientais têm chamado muita atenção. Atualmente, são considerados uma medida promissora nas melhorias da diversidade morfológica do canal e dos ecossistemas fluviais.

Os esporões podem ser classificados em diversas categorias. De acordo com a permeabilidade estrutural, são geralmente categorizados em dois tipos: permeáveis e impermeáveis (figura 1.3a). Esporões impermeáveis são construídos utilizando pedras, cascalhos, rochas ou gabiões, enquanto esporões permeáveis usualmente consistem de varias filas de madeira, bambu, aço ou pilares de betão armado. Um esporão impermeavel bloqueia e redireciona o escoamento,

enquanto que um esporão permeável permite que a água passe por ele a uma velocidade reduzida. No que diz respeito ao seu ângulo com o escoamento, os esporões podem ser classificados por três categorias: normal ao escoamento, inclinado para montante e inclinado para jusante (figura 1.3b). Podem também ser classificados de acordo com a sua forma. Para além do comum esporão retilíneo, é possível serem utilizadas outras geometrias que geralmente estão relacionadas com a geometria da sua cabeça, como é possível observar, por exemplo, na figura 1.3c, duas geometrias possíveis de entre outras, em forma de "L" e de "T".

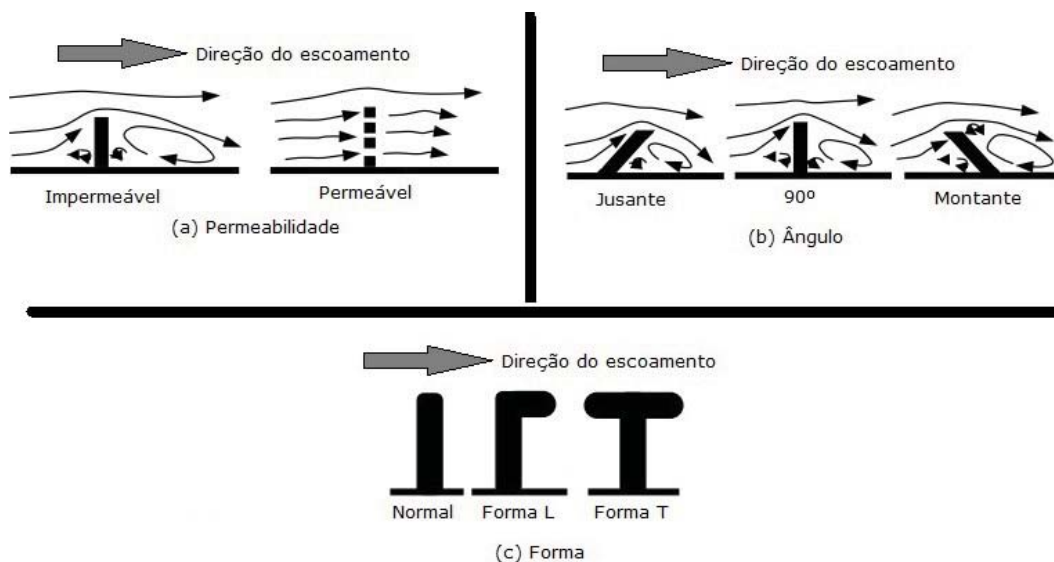


Figura 1.3: Classificação de esporões quanto à: (a) Permeabilidade; (b) Ângulo; (c) Forma. Adaptado de [10]

Com esta dissertação, pretende-se analisar de que forma a geometria do esporão tem influência no escoamento que passa por ele, com recurso a *software* de modelação numérica. Será feita uma análise ao escoamento que passa em um canal meandrizado, numa primeira fase sem qualquer esporão, comparando os resultados com a componente laboratorial, e numa segunda fase, apenas com a componente computacional, com introdução de esporões com diferentes geometrias.

## 1.2 Organização da dissertação

A organização da dissertação espelha o procedimento adotado de modo a atingir os objetivos do trabalho. Assim, a presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro e atual capítulo é de caráter introdutório e refere o enquadramento da dissertação e os principais objetivos da mesma.

O segundo capítulo é referente à Dinâmica de Fluidos Computacional, apresentando-se as equações governativas que regem os modelos de turbulência utilizados neste trabalho, bem como a descrição destes mesmos modelos e suas equações de transporte. São explicados os modelos de discretização do *software* utilizado.

No capítulo terceiro é descrita a metodologia adotada para realização das modelações numé-

ricas, é efetuada a validação do modelo computacional utilizado e são comparados os valores do modelo com valores experimentais obtidos anteriormente.

No quarto capítulo são introduzidos na secção de entrada de uma curva no extradorso do canal do modelo referido no capítulo 5, esporões de forma e ângulo variados. Nos primeiros três casos é efetuada uma análise de ângulo, 90° 45° e 135 para o caso 1, 2 e 3 respetivamente. No caso 4 foi analisada a forma do esporão em L e no último caso a forma do esporão em T. Foi analisado o campo de escoamento e as tensões de corte para todos os casos.

Por fim, no quinto e último capítulo, são apresentadas as conclusões deste estudo, referindo recomendações para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Dinâmica de Fluidos Computacional

#### 2.1 Introdução

A Dinâmica de Fluidos Computacional (na literatura inglesa *Computational Fluid Dynamics*, CFD), é o ramo da mecânica dos fluidos responsável pela análise numérica de fenômenos ocorrentes num determinado escoamento.

Ao comparar tudo o que é possível efetuar num computador hoje em dia com o que acontecia há 40 anos atrás, observa-se uma notável evolução tecnológica. Com o CFD aconteceu exatamente o mesmo. Na década de 70 apenas era possível efetuar simulações numéricas em duas dimensões, devido não só às limitações nos algoritmos existentes mas principalmente limitações de processamento e armazenamento dos computadores existentes na época [11]. Com o aparecimento de supercomputadores e de novos modelos computacionais é possível realizar, nos dias de hoje, simulações computacionais de praticamente qualquer problema do ramo de mecânica dos fluidos.

Existe uma vasta aplicabilidade do CFD, desde Engenharia Automóvel, Engenharia Aeronáutica e também Engenharia Civil. Na figura 2.1 apresenta-se como exemplo, um caso de de uma simulação de um descarregador de uma barragem. No caso desta dissertação, é efectuado uma analise com recurso a *software* CFD em simulações de caudal de um rio.

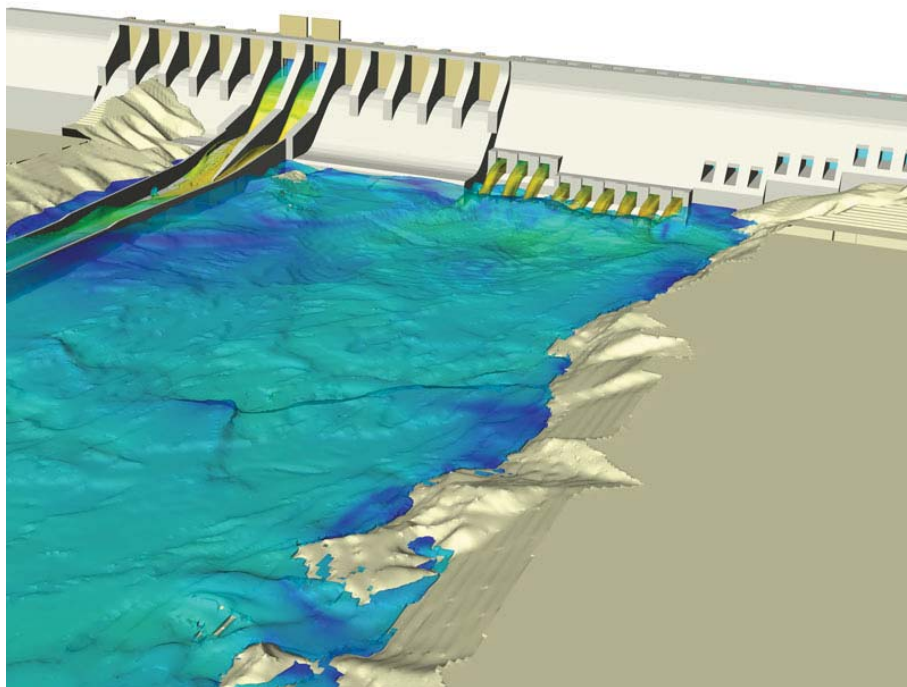


Figura 2.1: Modelação do descarregador de uma barragem [12]

A principal vantagem do CFD é mesmo essa, a sua aplicabilidade nas diversas áreas de mecânica de fluidos pois qualquer caso prático pode ser simulado em computador. De referir que ao realizar uma análise numérica em computador de um qualquer caso, é indispensável a validação desse mesmo caso com um modelo prático, ainda que na análise numérica possam existir pequenas alterações à posteriori da validação do modelo nomeadamente alterações de velocidades, introdução de objetos que bloqueiam o escoamento, etc.

No decorrer deste capítulo vão ser abordadas as equações governativas que regem os modelos utilizados bem como o significado de cada um destes modelos com especial atenção nos modelos utilizados na realização desta dissertação.

## 2.2 Equações governativas

### 2.2.1 Conservação da massa

Em física, a equação da continuidade expressa a lei da conservação da massa de forma matemática, tanto de forma integral como diferencial. Quando aplicado este princípio a um volume infinitesimal de fluido num escoamento, é escrito pela equação seguinte:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.1)$$

em que  $t$  é o tempo,  $\rho$  é a massa volúmica,  $x_i$  a posição da partícula e  $u_i$  é a componente da velocidade na direção  $i$ . Sendo a massa volúmica constante ao longo do tempo para fluidos incompressíveis, podemos então expandir a equação 2.1 a um sistema de coordenadas cartesianas tomando assim a forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

em que  $u, v, w$ , são as componentes da velocidade nas direções  $x, y, z$ , respetivamente.

### 2.2.2 Quantidade de movimento

A segunda lei de Newton, escrita para um elemento de fluido (na forma diferencial), relaciona o conjunto de forças externas com as grandezas de massa e de aceleração do seu movimento. Ao substituir o tensor das tensões viscosas pela relação constitutiva entre a tensão e a taxa de deformação para fluidos Newtonianos e isotrópicos (propriedades físicas independentes da direção considerada), a equação de Navier-Stokes para um fluido de viscosidade  $\mu$  pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \left( -\overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (2.3)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $p$  a pressão e  $u'_i$  é a flutuação da velocidade na direção  $i$ . Esta equação é válida em qualquer escoamento de fluido Newtoniano e traduz um balanço entre o produto da massa pela correspondente aceleração (ou seja a taxa de variação da quantidade de movimento), por um lado e o conjunto das forças (gravíticas, de pressão e de atrito viscoso) a que a mesma se encontra sujeita, por outro.

As equações 2.1 e 2.3 são conhecidas pelas Equações Médias de *Reynolds* ou simplesmente equações RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*). Estas equações são muito parecidas com as equações instantâneas de *Navier-Stokes*, tendo apenas a particularidade das velocidades e outras variáveis serem agora uma média temporal. Ao procurar-se definir a equação de Navier-Stokes para o escoamento médio introduziram-se novas incógnitas, representadas na equação pelo termo  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ . Este termo é conhecido pelas tensões de *Reynolds* e tem de ser modelado, recorrendo a modelos de turbulência, de maneira a que o sistema de equações tenha solução.

### 2.3 Variáveis características de escoamento turbulento

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

- **Intensidade da turbulência**

A intensidade da turbulência,  $I$ , é definida como a razão da média da flutuação da velocidade  $u'$  com a velocidade média do escoamento  $U$ . Tipicamente, toma valores entre 1% e 10%, considerados valores de intensidade turbulenta baixos, porém pode atingir os 60%.

$$I = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U} \quad (2.4)$$

- **Comprimento característico de turbulência**

O comprimento característico de turbulência,  $l$ , é uma quantidade física que descreve o tamanho dos grandes vórtices que contêm energia em escoamento turbulento. Uma vez que o comprimento turbulento é uma quantidade que é intuitivamente fácil de se relacionar com o tamanho físico do problema é fácil estimar um valor razoável para a escala de comprimento da turbulência. Este valor de  $l$  não deve ser normalmente maior que a dimensão geométrica do problema, pois isso significaria que os vórtices turbulentos seriam maiores que o domínio do escoamento. O comprimento característico de turbulência é calculado por:

$$l = C_\mu \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

Onde  $k$  e  $\varepsilon$ , definidos de seguida pelas equações 2.6 e 2.7, são a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação turbulenta, respetivamente e  $C_\mu$  é uma constante empírica especificada no modelo de turbulência, de valor 0,09.

- **Energia cinética turbulenta**

Tendo o valor da intensidade turbulenta,  $I$ , é possível obter a energia cinética turbulenta:

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2 \quad (2.6)$$

- **Taxa de dissipação turbulenta**

Sabendo o valor da energia cinética turbulenta,  $k$ , e o valor da viscosidade cinemática turbulenta,  $\nu_T$ , calcula-se a taxa de dissipação turbulenta,  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{C_\mu k^2}{\nu_T} \quad (2.7)$$

- Taxa de dissipação específica

Sabendo o valor da energia cinética turbulenta,  $k$ , e da taxa de dissipação turbulenta,  $\varepsilon$ , e também sendo conhecido o valor da constante empírica,  $C_\mu$ , pode-se determinar a taxa de dissipação específica,  $\omega$  pela relação:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad (2.8)$$

- Viscosidade cinemática turbulenta

Relacionando a intensidade da turbulência com a viscosidade cinemática e o número de Reynolds, obtém-se o valor da viscosidade cinemática turbulenta  $\mu_t$ , dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.9)$$

e sabendo que:

$$\mu_t = \rho \nu_t, \quad (2.10)$$

pode chegar-se à equação:

$$\nu_t = 0.22 \nu I Re \frac{l}{D} \quad (2.11)$$

## 2.4 Modelos de discretização

### 2.4.1 Método dos Volumes Finitos

No método dos volumes finitos o domínio é dividido num número de volumes de controlo, ou células, onde a variável em estudo está localizada no centróide do volume de controlo. No passo seguinte as equações governativas são integradas na forma diferencial ao longo de cada volume de controlo recorrendo para o efeito ao Teorema de Gauss. Desta forma, na equação resultante, as derivadas e os fluxos são determinados segundo formas de interpolação assumidas, resultando numa equação que envolve as variáveis nos centróides das células. Designa-se esta equação, equação da discretização, e expressa a lei governativa para a variável do volume de controlo [13].

### 2.4.2 Método de resolução - "Pressure-Based"

O método numérico "pressure-based" emprega um algoritmo que pertence a uma classe mais ampla designada de métodos de projecção. Nos métodos de projecção, o constrangimento da conservação da massa (continuidade) do campo de velocidades é alcançado ao resolver uma equação de pressão (ou de correcção de pressão). Esta equação é obtida das equações de continuidade e de balanço de quantidade de movimento, de tal forma que o campo de velocidades, corrigido pela pressão, satisfaz a continuidade. As equações que governam o escoamento são não-lineares e acopladas (entre si), logo o processo de solução é iterativo, onde o sistema de equações é resolvido repetidamente até que a solução convirja.

No programa *FLUENT* [13] existem dois algoritmos de implementação do processo iterativo: algoritmo "segregated" e o algoritmo "coupled". No algoritmo "segregated", as equações são

resolvidas sequencialmente (segregadas/desacopladas umas das outras). Devido a esta característica específica, este algoritmo é eficiente na utilização de memória, pois as equações discretizadas só necessitam de serem armazenadas uma de cada vez. Contudo, a convergência da solução é relativamente lenta, dado que as equações estão desacopladas. O algoritmo "segregated", em cada iteração, consiste em cada um dos seguintes passos:

1. Actualização das propriedades do fluido (tais como a massa específica e a viscosidade molecular), incluindo a viscosidade turbulenta, baseada na solução actual. (Se o cálculo se inicia, as propriedades do fluido são inicializadas de acordo com as condições de inicialização);
2. Resolver as equações de balanço de quantidade de movimento, uma após a outra, usando os valores recentemente atualizados da pressão e dos fluxos de massa em cada face de cada volume de controlo;
3. Resolver a equação de correção de pressão, utilizando os recentemente obtidos campo de velocidades e fluxo de massa;
4. Corrigir os fluxos de massa (em cada face de cada volume de controlo), pressão e o campo de velocidades, utilizando a correcção de pressão obtida no passo 3;
5. Resolver as equações escalares adicionais, tais como as quantidades turbulentas, usando os valores actuais das variáveis já calculadas;
6. Verificar a convergência das equações. Se os critérios de convergência forem alcançados, o processo iterativo termina, caso contrário volta-se ao passo 1.

O algoritmo "coupled", ao contrário do que acontece no algoritmo anteriormente descrito, resolve um sistema de equações acopladas, compreendendo a equação de balanço de quantidade de movimento e a equação de continuidade. Deste modo, os passos 2 e 3 do algoritmo "segregated" são substituídos por um único passo no qual o sistema de equações é resolvido. As restantes equações são resolvidas separadamente. Ao resolver um sistema de equações acopladas, a convergência da solução é significativamente acelerada. Na figura 2.2 apresenta-se um fluxograma resumo do método de resolução "Pressure-Based".

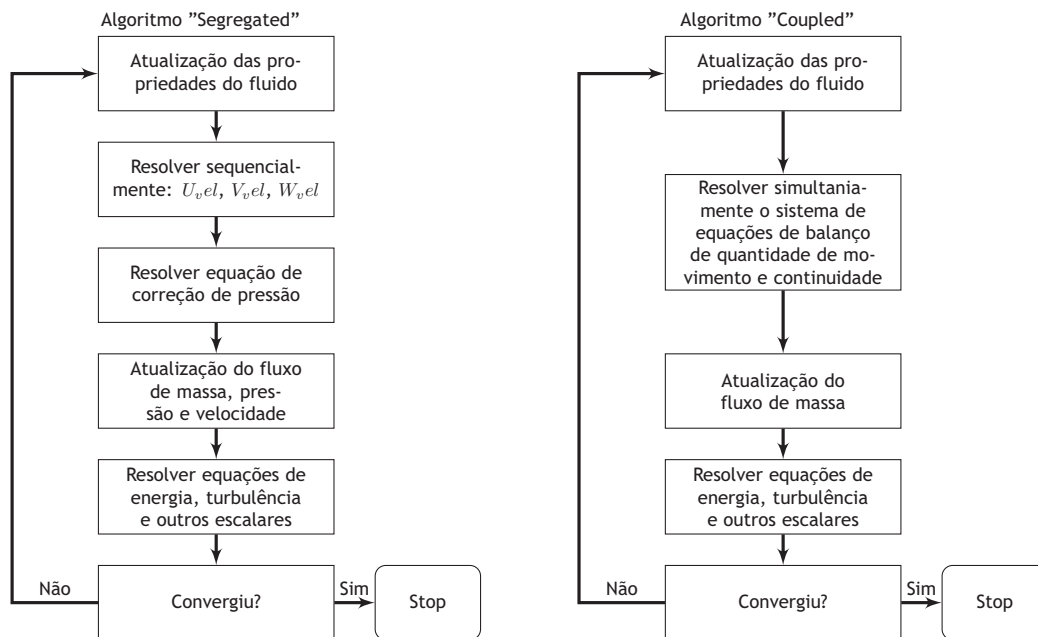


Figura 2.2: Fluxograma do método numérico "Pressure-based"

## 2.5 Modelos de resolução numérica

Um escoamento turbulento é caracterizado pela flutuação do campo de velocidades. Estas flutuações misturam as grandezas transportadas tais como a quantidade de movimento e energia e fazem com que estas grandezas sofram também elas flutuações [14]. Como estas flutuações podem ser de baixa escala e alta frequência, elas são computacionalmente muito pesadas para simular diretamente. Em vez de serem utilizadas as equações governativas exatas, pode ser feita uma transformação a estas equações para efetuarem uma média temporal das grandezas, resultando numa redução do esforço computacional. No entanto, estas equações modificadas contêm variáveis adicionais que são desconhecidas sendo necessários modelos de turbulência para determinar estas variáveis em termos de quantidade conhecida. [13]

No *software* de cálculo *FLUENT*, utilizado nesta dissertação, estão disponíveis de entre outros, os seguintes de modelos de turbulência:

- Modelo Spallart-Allmaras
- Modelos  $k-\epsilon$ 
  - Modelo  $k-\epsilon$  - Padrão
  - Modelo  $k-\epsilon$  - RNG
  - Modelo  $k-\epsilon$  - Realizable
- Modelos  $k-\omega$ 
  - Modelo  $k-\omega$  - Padrão
  - Modelo  $k-\omega$  - Shear-stress transport (SST)
- Modelo  $v^2-f$

- Modelo de tensões de Reynolds (RSM)
  - Modelo Linear pressure-strain RSM
  - Modelo Quadratic pressure-strain RSM
  - Modelo Low-Re stress-omega RSM
- Detached eddy Simulation (DES)
  - Modelo Spallart-Allmaras RANS
  - Modelo  $k-\varepsilon$  RANS
  - Modelo  $k-\omega$  SST RANS
- Large eddy Simulation (LES)
  - Modelo Smagorinski-Lilly subgrid-scale
  - Modelo WALE subgrid-scale
  - Modelo Kinetic-energy subgrid-scale

É um facto que nenhum dos modelos de turbulência é universalmente aceite como sendo o mais adequado para todos os problemas. A escolha de um modelo de turbulência vai depender de varios factores como as características do escoamento, a prática estabelecida para a classe de problema específico, o nível de precisão necessário, os recursos computacionais e o tempo que se pode dispendir para as simulações. Para a escolha mais apropriada do modelo, é necessário um conhecimento muito elevado das capacidades e limitações das várias opções. Tendo em conta os fatores acima descritos, foram escolhidos os modelos de turbulência que passam a ser descritos de seguida.

### 2.5.1 Modelo Spalart-Allmaras

O modelo Spalart-Allmaras é um modelo relativamente simples de uma equação que resolve uma equação de transporte modelada para a viscosidade cinemática. Este modelo engloba uma classe de modelos de uma equação na qual não é necessário calcular a escala de comprimento em relação à espessura da camada limite [15].

Na sua forma original, o modelo Spalart-Allmaras é um modelo de baixo Reynolds, precisando que a região da camada limite afetada pela viscosidade, fosse completamente desenvolvida. No *FLUENT* no entanto, foram incorporadas funções de parede no modelo para quando a malha não é suficientemente refinada [16].

A variável de transporte no modelo Spalart-Allmaras,  $\tilde{\nu}$ , é idêntica à viscosidade cinemática turbulenta exceto numa região junto à parede. A equação de transporte para  $\tilde{\nu}$  é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_\nu} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \right\} + C_{b2\rho} \left( \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_\nu \quad (2.12)$$

Onde  $G_\nu$  é a produção da viscosidade turbulenta,  $Y_\nu$  é a destruição de viscosidade turbulenta que ocorre na região próxima da parede devido ao bloqueio da parede e o amortecimento viscoso,  $\sigma_\nu$  e  $C_{b2}$  são constantes e  $\nu$  é a viscosidade cinemática molecular.  $S_\nu$  é um termo definido pelo

utilizador.

As constantes do modelo,  $C_{b1}$ ,  $C_{b2}$ ,  $\sigma_{\bar{v}}$ ,  $C_{\nu_1}$ ,  $C_{w1}$ ,  $C_{w2}$ ,  $C_{w3}$  e  $\kappa$  tomam os valores seguintes:

$$C_{b1} = 0.1355; C_{b2} = 0.622; \sigma_{\bar{v}} = \frac{2}{3}; C_{\nu_1} = 7.1$$

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{K^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma_{\bar{v}}}; C_{w2} = 0.3; C_{w3} = 2.0; \kappa = 0.4187$$

## 2.5.2 Modelo $k$ - $\varepsilon$ RNG

Este modelo é um refinamento do modelo  $k$ - $\varepsilon$ , sendo que é derivado diretamente a partir das equações de Navier-Stokes, usando uma técnica matemática denominada por “Renormalization Group Method” (RNG). A abordagem RNG, pode ser usada para gerar um modelo de turbulência semelhante ao  $k$ - $\varepsilon$  padrão, resulta de uma forma modificada da equação  $\varepsilon$ , que tenta explicar as diferentes escalas de movimento através de alterações ao termo de produção. Logo, em teoria o modelo  $k$ - $\varepsilon$  RNG é mais preciso e confiável, para uma classe mais ampla de escoamentos comparativamente ao modelo  $k$ - $\varepsilon$  padrão [13].

O modelo  $k$ - $\varepsilon$  RNG é muito semelhante ao nível de forma das equações de transporte do modelo  $k$ - $\varepsilon$  padrão. As equações de transporte que permitem a caracterização de  $k$  e  $\varepsilon$  estão escritas de seguida:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.13)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.14)$$

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

A viscosidade turbulenta neste modelo é dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

As constantes do modelo tomam os seguintes valores:

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

A principal diferença para o modelo  $k$ - $\varepsilon$  padrão é o termo adicional na equação  $\varepsilon$  [17], que é dado por:

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_o) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.16)$$

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

### 2.5.3 Modelo $k-\omega$

O modelo  $k-\omega$  desenvolvido por Wilcox [18], é um modelo empírico baseado no modelo de equações de transporte para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a taxa de dissipação específica ( $\omega$ ), que também pode ser vista como um rácio entre  $\varepsilon$  e  $k$ .

Este modelo foi melhorado ao longo dos anos e foram intruduzidos termos de produção em ambas as equações de  $k$  e  $\omega$ , que melhoraram significativamente a precisão do modelo [13]. A energia cinética turbulenta,  $k$ , e a taxa de dissipação específica,  $\omega$ , são obtidas pelas equações de transporte seguintes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2.18)$$

Nestas equações,  $G_k$  representa a produção de energia cinética turbulenta devido aos radientes de velocidades médias.  $G_\omega$  representa a produção de  $\omega$ .  $\Gamma_k$  e  $\Gamma_\omega$  representam a difusividade efetiva de  $k$  e  $\omega$ , respetivamente.  $Y_k$  e  $Y_\omega$  representam a dissipação de  $k$  e de  $\omega$  devido à turbulência.  $S_k$  e  $S_\omega$  são termos definidos pelo utilizador.

As constantes do modelo tomam os valores apresentados de seguida:

$$\alpha_\infty^* = 1; \alpha_\infty = 0.52; \alpha_o = \frac{1}{9}; \beta_\infty^* = 0.09; \beta_i = 0.072; R_\beta = 8$$

$$R_k = 6; R_\omega = 2.95; \zeta^* = 1.5; M_{t0} = 0.25; \sigma_k = 2.0; \sigma_\omega = 2.0$$

### 2.5.4 Modelo $k-\omega$ SST

O modelo  $k-\omega$  SST foi desenvolvido por Menter [19] e é um modelo que partilha características dos modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$ , pois resulta de uma combinação dos mesmos. Este modelo torna-se num modelo  $k-\varepsilon$  na região externa da camada limite, enquanto que na parte interior se torna num modelo  $k-\omega$ . No que diz respeito às equações de transporte, o modelo  $k-\omega$  SST possui uma forma semelhante ao modelo  $k-\omega$ , mas inclui características próprias.

Para conseguir este modelo, Menter considerou no modelo  $k-\varepsilon$  padrão para elevado numero de Reynolds e transformou-o numa formulação do modelo  $k-\omega$ . Seguidamente este modelo foi multiplicado por uma função de combinação,  $(1 - F_1)$  e somado ao modelo  $k-\omega$  original por sua vez multiplicado por  $F_1$ . A função de combinação foi concebida para ser 1 na região próxima da parede, que ativa o modelo padrão  $k-\omega$ , e 0 distante da parede, o que ativa o modelo  $k-\varepsilon$  alterado. O modelo SST incorpora um termo de difusão transversal amortecida na equação  $\omega$ . A definição de viscosidade turbulenta é modificada para ter em conta o transporte da tensão de corte turbulenta na parede. Com estas características o modelo SST torna-se mais preciso para uma classe mais ampla de escoamentos que o modelo  $k-\omega$  padrão. Para além destas, outras modificações incluem a adição de um termo de difusão cruzada na equação  $\omega$  e uma função de mistura para garantir que as equações do modelo se comportam adequadamente em ambas as

zonas da parede[19].

A energia cinética turbulenta,  $k$ , e a taxa de dissipação específica,  $\omega$ , são obtidos pelas seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.20)$$

Nestas equações,  $G_k$ , representa a produção de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade,  $G_\omega$  representa a produção de  $\omega$ ,  $\Gamma_k$  e  $\Gamma_\omega$  representam a difusividade efetiva de  $k$  e  $\omega$ , respetivamente.  $Y_k$  e  $Y_\omega$  representam a dissipação de  $k$  e de  $\omega$  devido à turbulência.  $D_\omega$  representa o termo de difusão cruzada.  $S_k$  e  $S_\omega$  são termos definidos pelo utilizador.

As constantes deste modelo tomam os valores apresentados de seguida

$$\sigma_{k,1} = 1.176, \sigma_{\omega,1} = 2.0, \sigma_{k,2} = 1.0, \sigma_{\omega,2} = 1.168, a_1 = 0.31, \beta_{i,1} = 0.075$$

$$\beta_{i,2} = 0.0828, \sigma_\infty^* = 1, \sigma_\infty = 0.52, \sigma_0 = \frac{1}{9}, \beta_\infty^* = 0.09$$

$$R_\beta = 8, R_k = 6, R_\omega = 2.95, \zeta^* = 1.5, M_{t0} = 0.25$$

## Capítulo 3

### Validação do modelo computacional

#### 3.1 Introdução

Sendo o escoamento em regime turbulento de uma elevada complexidade, é necessário validar o modelo computacional com um modelo experimental, tal como já foi referido no Capítulo 2. Isto é efetuado para garantir que os resultados obtidos em computador são legítimos e que não existem erros, quer na malha, quer nos dados inseridos no *software* de cálculo.

Na utilização do *software* de cálculo *ANSYS Fluent*, o cuidado e atenção na inserção de todos os parâmetros do escoamento é fundamental, pois ao mínimo erro, os resultados obtidos não correspondem à realidade. Daí ser necessária a validação do modelo computacional, fazendo deste capítulo um dos mais importantes neste estudo, pois dele depende toda a veracidade dos resultados obtidos em toda esta dissertação.

Previamente à realização desta dissertação, foi efetuado um trabalho experimental que permitiu caracterizar o escoamento na curva em análise. Este trabalho, realizado por Vicario [20], servirá de base à validação do modelo computacional.

Neste capítulo apresenta-se então:

- O modelo experimental;
- O modelo computacional;
- Resultados obtidos em ambos os modelos.

#### 3.2 Modelo experimental

O modelo experimental, localizado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI), é constituído por cinco meandros razoavelmente aproximados por funções cosseno de argumento variável ao longo do percurso, tendo os primeiros três meandros um raio mínimo de curvatura igual a 1,25m e os restantes, um raio mínimo de curvatura igual a 1,60m. Foi construído no interior do canal de morfologia fluvial com cerca de 28m de comprimento e 4m de largura. A Figura 3.1 representa este mesmo canal, com todos os componentes necessários, visto em planta.

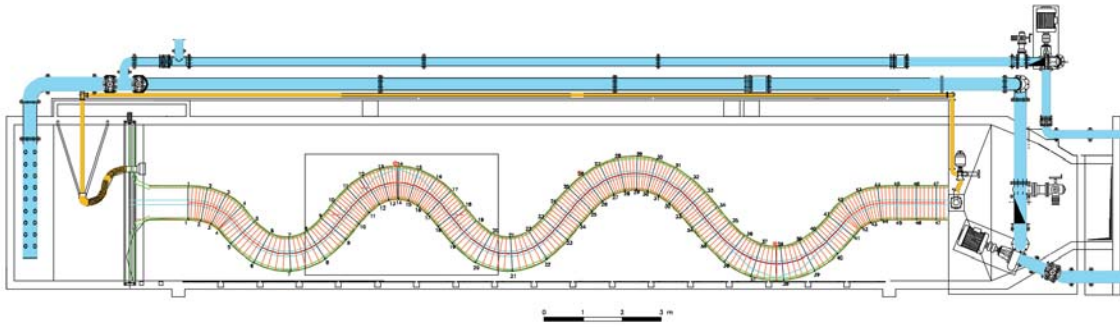


Figura 3.1: Esquema do modelo experimental em planta; adaptado de [21]

Na figura 3.2 apresenta-se de forma ampliada a segunda curva do canal meandrizado apresentado na figura 3.1. Nesta figura são visíveis a secção de entrada da curva 9C, a secção de saída da curva 18A, a secção central C e duas secções intermédias 11D e 16. As medições experimentais foram efetuadas por Vicario [20], restringindo-se a esta mesma curva do canal, nessas mesmas secções assinaladas.

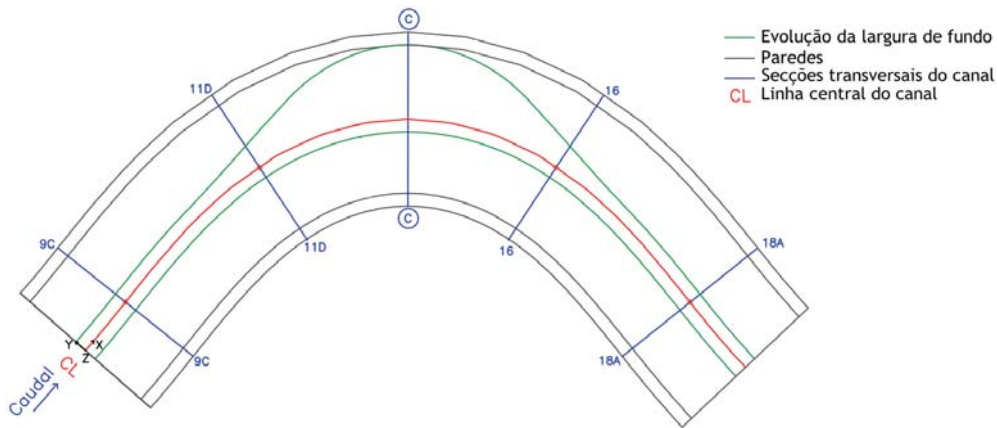


Figura 3.2: Área de estudo e secções a serem analisadas; Adaptado de [20]

A inclinação lateral do canal varia de modo a aproximar-se das características de meandros naturais. Assim a inclinação aumenta gradualmente dos 45° (Secção 9C) até à vertical (Secção C). Na figura 3.3 estão representadas estas secções para melhor uma compreensão desta variação da inclinação.

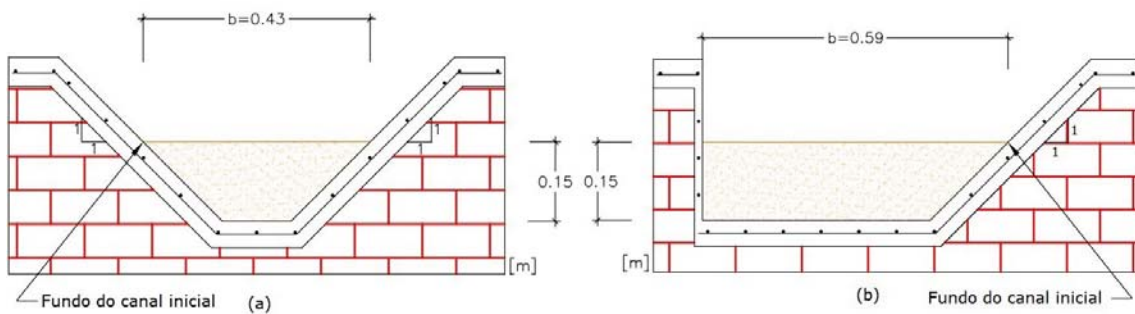


Figura 3.3: Secções transversais antes do início do caso experimental: (a) Secção 9C; (b) Secção C; Adaptado de Vicario [20]

Este canal foi construído em poliestireno e argamassa, tendo acabamentos com um material impermeável. A sua secção transversal, a profundidade média do escoamento e o declive do canal foram determinados com base nas teorias de regime para canais com fundo arenoso e margens coesas, para um caudal de  $20 \text{ l/s}$  e  $D_{50} = 0,86 \text{ mm}$ . A Figura 3.4 demonstra a imagem geral do canal antes do início do ensaio.



Figura 3.4: Foto do canal; [20]

O fundo do canal foi coberto com uma camada uniforme de areia de 15cm de espessura (visível na figura 3.3) e o ensaio foi iniciado com caudal de  $20 \text{ l/s}$ , até o equilíbrio dinâmico estar estabelecido. Procedeu-se seguidamente a uma impermeabilização do fundo, mantendo a rugosidade, para facilitar as medições a serem efetuadas.

A medição pontual das três componentes do campo de velocidades foi realizada através de um medidor de velocidades acústico Doppler (ADV), designado de vectrino. O aparelho foi posicionado em cada uma destas secções, paralelamente a 6cm da parede exterior da curva, registando pontos a cada 1cm.

Ainda durante o mesmo estudo efectuado por Vicario [20], foi criada uma malha para a secção central com bastante mais pontos obtendo assim mais informações sobre o escoamento naquela secção da curva.

A configuração de fundo após equilíbrio dinâmico, foi obtida através de uma estação Total Leica M550, que após tratamento de dados serviu de geometria base para a análise computacional. Essa geometria apresenta-se na figura 3.5.

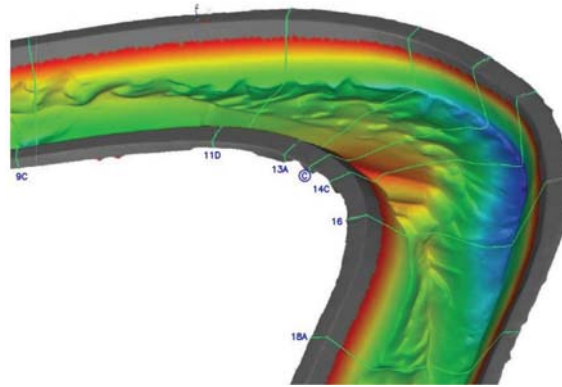


Figura 3.5: Geometria obtida pelo levantamento efetuado na estação Total Leica M550; Adaptado de [20]

### 3.3 Metodologia para execução de um modelo computacional

Quando se tenta efetuar uma análise numérica pela primeira vez, a adaptação ao *software* utilizado pode não ser a melhor pois por vezes o *software* não é *user-friendly*. A falta de informação de como o fazer pode, por vezes, levar imediatamente à desistência. Nesta dissertação utilizou-se uma metodologia descrita abaixo para obtenção adequada de resultados. Estes pontos referidos seguidamente, são a essência de qualquer resolução numérica sendo por isso possível aplicar esta metodologia em qualquer caso que se pretenda resolver.

- **Identificação do problema**

1. **Definir o objetivo**

Numa fase inicial é importante definir quais os resultados que são pretendidos, qual o grau de precisão que é necessário e quanto tempo se pode dispender para a análise do problema.

2. **Identificar o domínio de cálculo**

Aqui procura-se tentar isolar o domínio de análise do domínio total, procurando reduzir o esforço computacional. Há que ter em atenção as condições de fronteira retira este domínio de análise, pois é necessário verificar se existe informação do tipo de fronteiras e se existem dados razoáveis nãs fronteiras em questão.

- **Pré Processamento**

3. **Geometria**

Neste ponto, pretende-se obter a região onde circula o fluido. Pode-se obter de diversas maneiras, desde fazer uso de modelos CAD existentes, retirando as regiões de fluido de partes sólidas ou até criar uma região nova, a partir do zero. É importante verificar se é possível efetuar simplificações de simetria ou periodicidade pois isso reduz significativamente o esforço computacional, sendo possível obter resultados bastante mais rápido.

4. **Malha**

A criação da malha consiste em dividir a geometria em vários elementos, elementos estes que são utilizados pelo *software* de resolução numérica para construir volumes de controlo. A malha pode ser estruturada ou não estruturada. Estruturada no caso de ter células quadrangulares ou hexaédricas e não estruturada no caso das células

serem triangulares ou tetraédricas.

Pesam a favor das malhas estruturadas a enorme facilidade de geração e o alto grau intuitivo dos algoritmos numéricos empregados na solução de problemas CFD que usam este tipo de malha.

A adaptação das malhas não-estruturadas em geometrias mais complexas é melhor devido à variedade das suas células. Vários exemplos de comparação entre estes dois tipos de malha podem ser encontrados em Maliska [22], Ferziger e Peric [23] e Lohner [24]. Entretanto, esta vantagem tem sido cada vez mais reduzida com o desenvolvimento de técnicas que tornam malhas estruturadas adaptadas a geometrias complexas.

Técnicas como as Body-Fitted Meshes, multiblocos de malha estruturadas e a Cut-Cell tentam compensar esta deficiência das malhas estruturadas frente às não-estruturadas. A mais simples delas, é a Cut-Cell, que apesar da extrema simplicidade demonstra bastante eficiência em quase todos os casos em que se lida com geometrias complexas. Ela consiste num mapeamento preliminar de onde há partes sólidas ou fluidas no domínio e no conseqüente reposicionamento dos centros de volumes que são parcialmente sólidos.

Cabe ainda destacar que devido à sua grande flexibilidade, uma malha não-estruturada bem construída frequentemente leva vantagem em dois aspectos:

- em termos de desempenho, quando há necessidade de se paralelizar um código (computação de alto desempenho);
- na adaptação a métodos mais modernos de discretização de domínio, como CVFEM (Volume de controlo baseados em elementos finitos), por exemplo, que é capaz de explorar as vantagens dos diferentes formatos de célula disponível em malhas não-estruturadas.

### 5. Definições no *Software*

Após ter sido criada a malha é necessário introduzi-la no *software* de resolução numérica bem como todos os parâmetros do escoamento. Desde condições de fronteira, velocidades de escoamento, características do próprio fluido, modelo computacional a utilizar, tudo tem de ser definido neste ponto para que a simulação represente ao máximo a realidade que se pretende.

#### • Resolução numérica

### 6. Resolução do modelo computacional

Este ponto resume-se a uma palavra apenas: Paciência. Todas as simulações têm um tempo associado à sua resolução, que vai depender de todos os pontos referidos anteriormente. Pode demorar minutos, horas ou até dias a resolver o caso. Tudo depende da complexidade da geometria, do refinamento da malha que pode ter mais ou menos pontos, do tipo de escoamento (bidimensional, tridimensional), ou mesmo o modelo numérico mais simples ou mais complexo. Mas o essencial é perceber que tudo isto leva o seu tempo.

Ao longo da simulação, pode efectuar-se uma análise ao gráfico de resíduos, onde se pode verificar se a solução está a caminho da convergência estipulada ou não. Caso não esteja no caminho certo é necessário uma verificação de tudo o que foi introduzido no programa. Desde a malha que pode precisar de ser mais refinada em certos pontos, características do escoamento mal introduzidas, etc.

- **Pós Processamento**

- 7. Analisar Resultados**

- Ao efectuar uma análise dos resultados, no fim de estar concluída a simulação, existem duas conclusões possíveis:

- Os resultados estão de acordo com o esperado;
    - Os resultados não estão de acordo com o esperado.

- No primeiro caso, de os resultados estarem de acordo com o que se pretende, o trabalho está feito e não é necessário alterar nada. Mas muitas vezes isso não acontece. E o que fazer nestes casos? Voltar ao ponto 3 e verificar a geometria refazendo tudo daí para a frente, voltar ao ponto 4 e refinar a malha onde for necessário obter resultados mais precisos, ou onde a geometria sofre mudanças de direção bruscas, verificar no ponto 5 se todos os dados inseridos estão corretos, etc. Até que se chega aos resultados esperados e pode dar-se finalmente por concluída a simulação.

O que se conclui desta metodologia é que tudo pode influenciar os resultados finais e é essa a dificuldade de uma simulação numérica. A complexidade do software, exige bastante atenção do utilizador e é importante não desistir quando os resultados não são os corretos pois isso acontece várias vezes e a cada vez que os resultados estão errados aprende-se a corrigir mais algum pormenor que tinha falhado em algum destes pontos. Mas se todos estes pontos estiverem corretos, os resultados vão ser de qualidade.

### 3.4 Modelo computacional

Na elaboração do modelo computacional foi utilizado um computador com um processador Intel Core i7-4700MQ a 2.40 GHz que possui 4 núcleos, cada um com 2 processadores lógicos, 8GB de memória RAM DDR3 a 1600MHz e um disco rígido Kingston HyperX SAVAGE SSD SATA III de 240GB.

Para obtenção da geometria do modelo, foram tratados os dados da estação Total Leica M550 em CAD, até à segunda curva do canal hidráulico. Após a segunda curva foi adicionada uma recta com 1m de modo a que o escoamento continuasse depois da curva sem que a zona montante da secção de saída fosse afetada, para melhor obtenção dos resultados na zona de saída. A geometria obtida é apresentada na figura 3.6. De referir que todas as simulações efetuadas nesta dissertação foram efectuadas com base nessa geometria, com fundo fixo, não erodível.

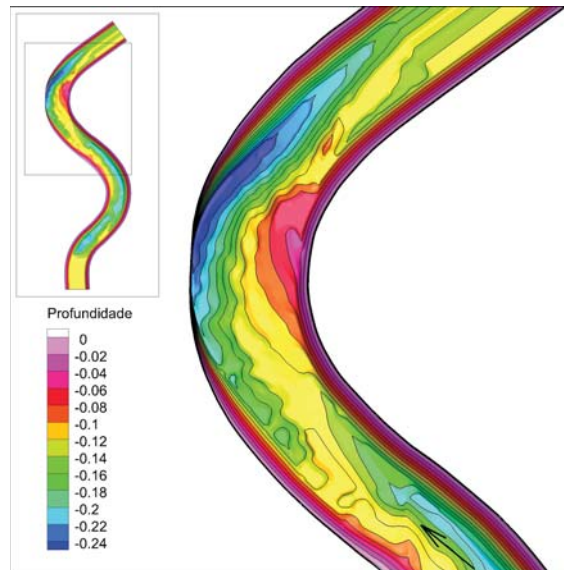


Figura 3.6: Geometria de fundo da curva em estudo

### 3.4.1 Malha

Na construção da malha, foi utilizado o software Pointwise, bastante utilizado para gerar malhas em CFD. Na sua construção, foi adotada um tipo de malha não estruturada, pela facilidade com que este tipo de malha se adapta à geometria do problema. Foi definido então um espaçamento entre pontos para a construção curvas de nível, gerando-se depois malhas entre curvas de nível, formando no final um bloco de varias malhas, sendo este bloco a malha final. Este espaçamento define o grau de refinamento da malha, que ao ser menor, origina uma malha mais refinada, com mais pontos.

Foram então criadas três malhas, com espaçamentos diferentes entre pontos, para testar qual o grau de refinamento que mais se aproximava dos resultados práticos. Para todas as três malhas foram adotadas as seguintes condições de fronteira:

- Entrada: Velocity Inlet, características descritas na tabela 3.1;

Tabela 3.1: Características do escoamento na entrada

Parâmetro	Valor
Velocidade	0,36 m/s
Intensidade turbulenta	3,4 %
Diâmetro hidráulico	0,345 m
Altura de água	0,12 m
Número de Reynolds	≈31000

- Fundo: Parede;
- Saída: Outflow;
- Superfície Livre: Parede, sem rugosidade.

Na tabela 3.2 está registrado o numero de pontos de cada malha e o tempo que demorou cada um dos casos a atingir a convergência, recorrendo ao modelo  $k-\varepsilon$  RNG, pois o tempo também é um fator importante nestas simulações.

Tabela 3.2: Resumo de cada malha

Caso	Distância entre pontos	Número de pontos	Tempo de iteração aproximado
Malha 1	10mm	1 085 307	10 h
Malha 2	15mm	432 823	3 h
Malha 3	20mm	195 533	0.5 h

O critério de convergência para todos os casos foi de  $10^{-5}$  para todos os valores do diagrama de resíduos obtido no *FLUENT*.

No final das simulações, foram sobrepostos os resultados correspondentes aos perfis de velocidade longitudinal, transversal e vertical, na secção central a 6cm da parede. Esses resultados estão dapresentados na figura 3.7.

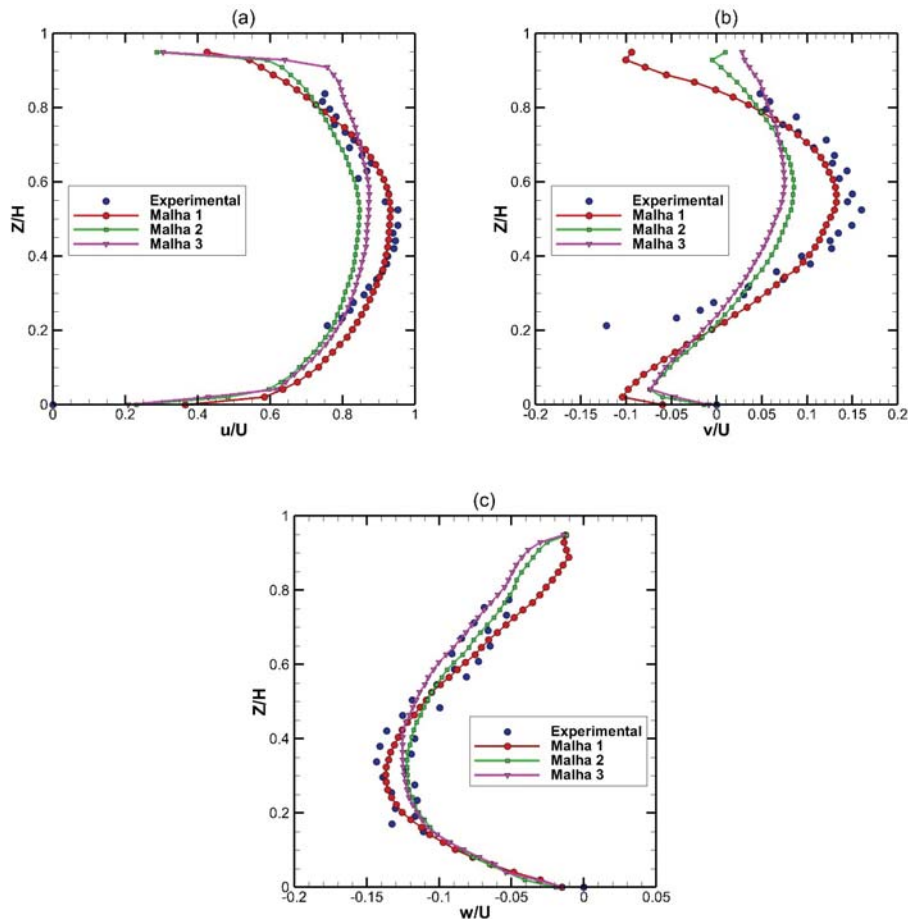


Figura 3.7: Perfil de velocidades para as varias malhas: (a) Velocidade longitudinal; (b) Velocidade transversal; (c) Velocidade vertical;

Ao analisar estes resultados, nota-se uma clara diferença entre as malhas utilizadas. A malha mais refinada, apresenta resultados mais próximos dos resultados experimentais em qualquer uma das três componentes do vetor velocidade analisadas. Ainda podia ser testada uma malha

ainda mais refinada, com 8mm de espaçamento ou até menos. O problema de refinar ainda mais a malha está na melhoria dos resultados não justificar os recursos computacionais utilizados.

### 3.4.2 Modelo de turbulência

Encontrada a dimensão ideal da malha para o trabalho presente, passa-se a analisar os modelos de turbulência, para que seja possível comparar resultados entre vários modelos e adotar o que apresenta melhores resultados.

Foram então escolhidos quatro modelos de turbulência, cujas equações de transporte estão referidas na secção 2.5, para comparação de resultados:

- Modelo Spalart-Allmaras;
- Modelo  $k-\varepsilon$  RNG, já analisado na escolha das malhas;
- Modelo  $k-\omega$ ;
- Modelo  $k-\omega$  SST.

Na figura 3.8 apresentam-se os resultados obtidos a partir dos modelos referidos anteriormente, comparados com os resultados obtidos experimentalmente, na secção central a 6cm da parede do extradorso.

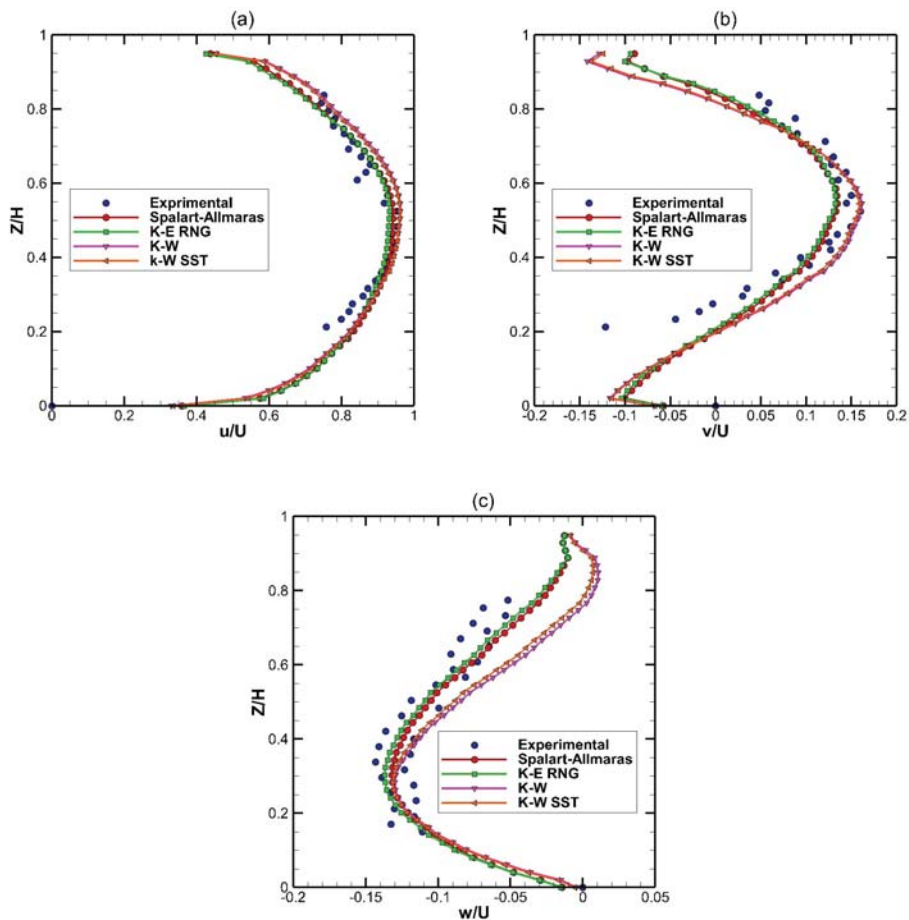


Figura 3.8: Perfil de velocidades para os varios modelos: (a) Velocidade longitudinal; (b) Velocidade transversal; (c) Velocidade vertical;

Ao observar os resultados verifica-se que os modelos  $k-\omega$ , tanto o modelo standard como o modelo SST, são aqueles que melhor se aproximam dos resultados obtidos a prática. Destes dois modelos, visto que os resultados dos dois são idênticos, houve uma necessidade de optar por um deles, sendo que se optou pelo modelo  $k-\omega$  standard, por requerer um pouco menos de recursos computacionais, levando assim menos tempo a realizar cada simulação.

### 3.4.3 Velocidade Longitudinal

Desta simulação, foi possível obter valores para a velocidade longitudinal em diversas secções do canal em estudo e as respetivas linhas de corrente, como apresentado na figura 3.9. As secções analisadas foram secções à superfície (3.9a), a 3cm de profundidade (3.9b), a 6cm de profundidade (3.9c) e a 9cm de profundidade (3.9d).

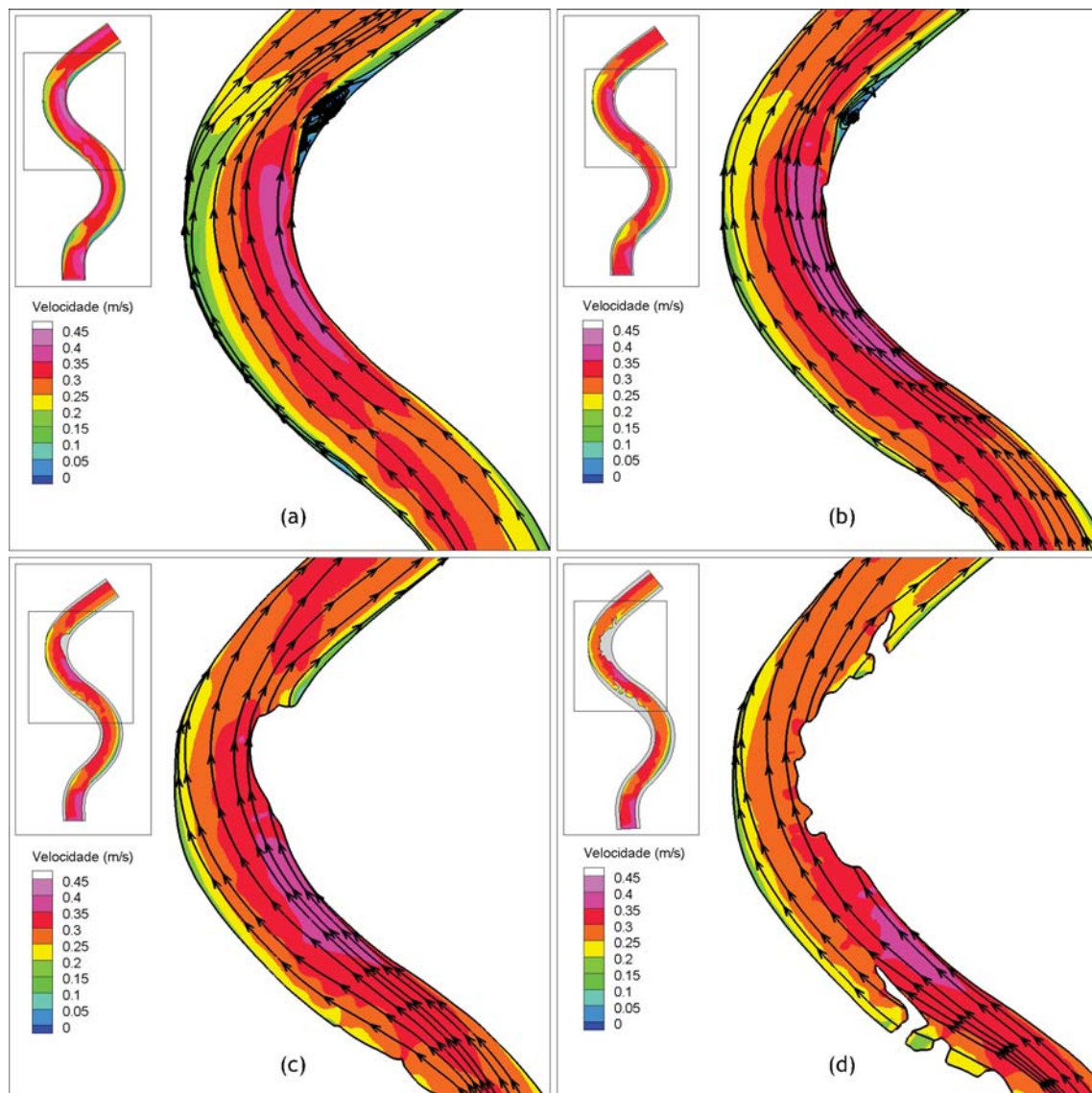


Figura 3.9: Velocidade do escoamento nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm;

Da análise da figura 3.9, pode constatar-se que a velocidade do escoamento é mais elevada no intradorso da curva, aspeto já referido por Abhari et al. em 2010 [25] e Vaghefi et al. em 2006 [26] nos estudo que efetuaram. Também é possível visualizar uma zona de separação do

escoamento da parede interior da curva, mais à saída da curva, aspecto também observado no trabalho experimental.

### 3.4.4 Velocidade em secção transversal

Num escoamentos em canal com superfície livre, as correntes secundárias aparecem porque a superfície livre e as paredes reduzem a intensidade da turbulência na direção normal à superfície, gerando anisotropia. Num canal meandrizado, a presença da aceleração centrípeta, originada pela força centrífuga que se desenvolve à medida que o escoamento passa o meandro, causa sobrelevação na superfície da água no extradorso do canal[20].

Analisando a secção transversal do escoamento proposta por Blanckaert em 2002 [27], a corrente secundária consiste numa zona de circulação na zona central e uma outra zona junto ao topo do extradorso da curva. Esta última tem um sentido de rotação inverso ao que da zona central, e, embora seja relativamente fraca, tem grande importância no processo de erosão da margem exterior, porque afasta dessa zona as velocidades superiores que vêm da secção central. Este fenómeno está esquematizado na figura 3.10.

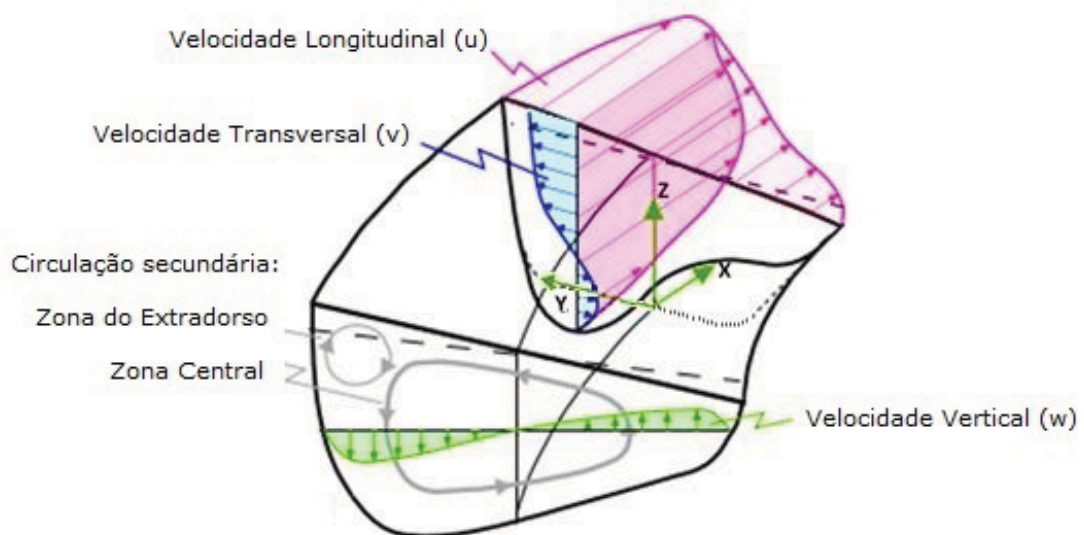


Figura 3.10: Esquema do escoamento em 3D num canal em curva; Adaptado de [27]

No caso em análise acontece exatamente o que foi proposto por Blanckaert. A figura 3.11 demonstra o fluxo secundário na secção central da curva, comparando com os resultados da secção experimental, obtidos por Vicario [20].

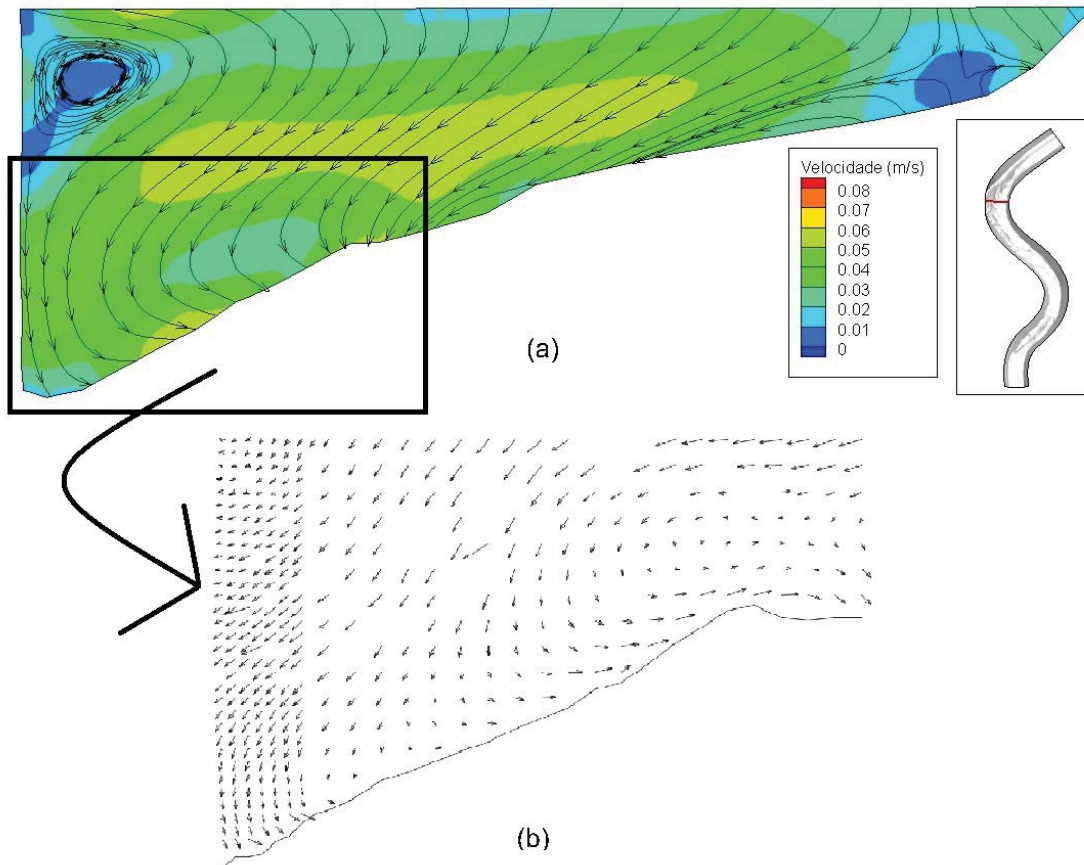


Figura 3.11: (a) Fluxo secundário na secção central da simulação do canal; (b) Fluxo secundário registado experimentalmente [20]

Vicario [20], apenas registou os resultados referenciados na figura 3.11b, pelo que ao comparar os resultados, mais uma vez se conclui que os resultados da simulação são idênticos aos registados experimentalmente pois as linhas de corrente de ambos os casos são idênticas. Embora não existam registos experimentais do fluxo secundário para as secções de entrada e saída da curva, 9C e 18A respetivamente (identificadas na figura 3.2), foi possível obtê-los através do modelo numérico. Esses valores do fluxo secundário, juntamente com os valores de duas secções intermédias da curva, 11D e 16, estão representadas na figura 3.12.

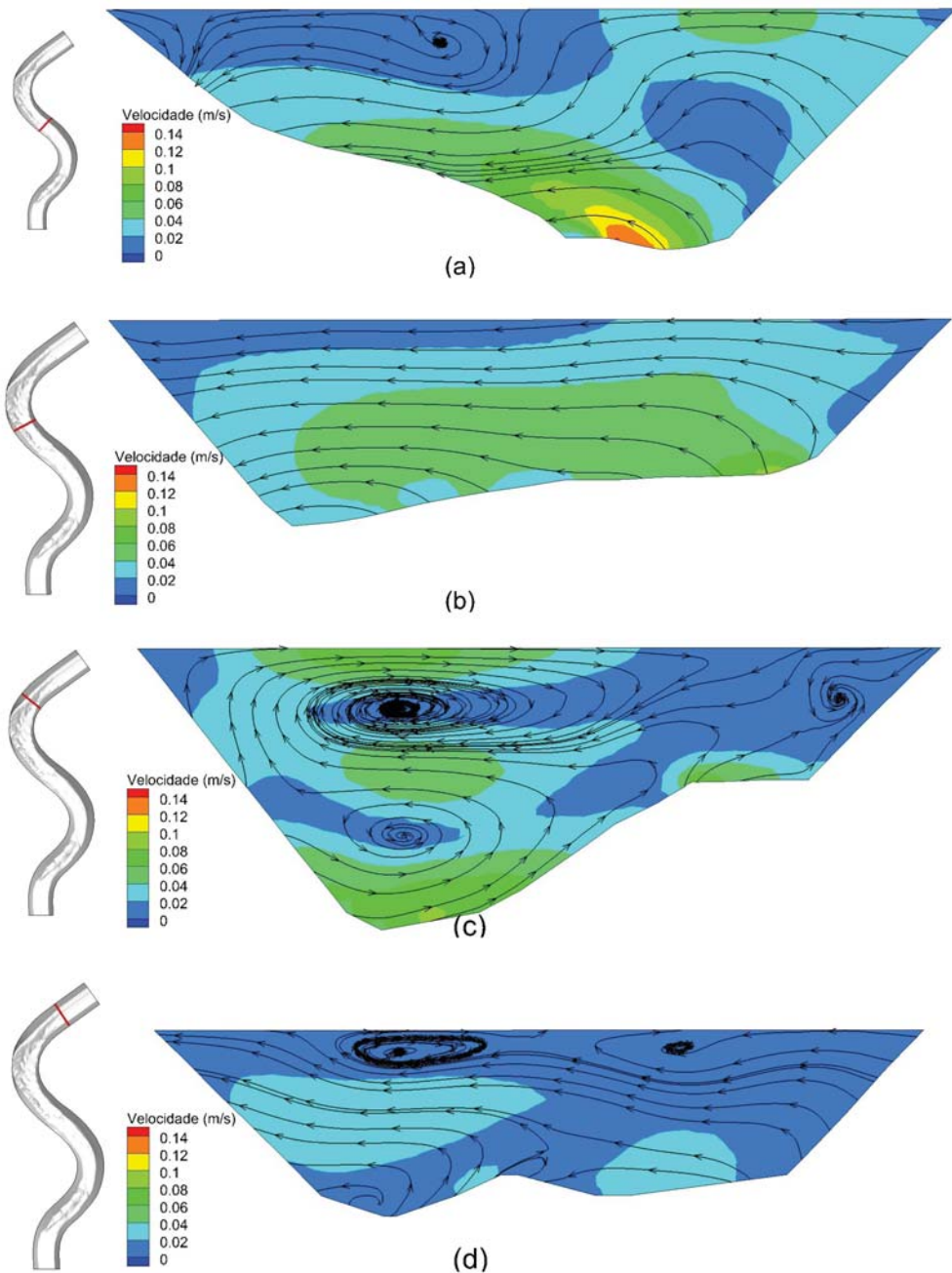


Figura 3.12: Fluxo secundário nas secções: (a) Entrada "9C"; (b) Intermédia "11D"; (c) Intermédia "16"; (d) Saída "18A"

Observando a figura 3.12, nota-se claramente um pequeno vórtice no topo da secção central da figura 3.12a, proveniente ainda da curva anterior, pois quando está percorrida cerca de um quarto da curva, não existe qualquer vórtice, sendo único o sentido do fluxo secundário, em direção do extradorso (figura 3.12b). Na secção central da curva, representada na figura 3.11, existe o aparecimento de um pequeno vórtice, junto ao topo do extradorso, que se desloca para a região central à medida que se aproxima do final da curva como é possível observar em 3.12c e também na secção final da curva, 3.12d. Ao atravessar o meio da curva, regista-se o aparecimento também de um vórtice no intradorso, de menor intensidade, que também ele se desloca para a zona central.

Este aspeto foi observado por Gholami et al. 2014 [28], num estudo efetuado com uma curva bastante acentuada, com o rácio entre o raio de curvatura,  $R_c$ , e a largura do canal,  $b$ , era igual ou inferior a 3 ( $R_c/b \leq 3$ ;  $R_c/b \leq 2.25$  para o caso desta dissertação). No estudo realizado por ele, também se registou um vórtice na zona superior do extradorso que se aproximou da zona central à medida que se aproximava do fim da curva e do aparecimento do segundo vórtice referido no capítulo anterior.

### 3.4.5 Tensões de corte

Em canais com fundo móvel, como é o caso, as tensões de corte que se desenvolvem junto ao leito, são um fator importante na sua erosão. Em zonas onde a tensão de corte é mais elevada será também mais provável que o material de fundo sofra deslocamento para outras zonas do canal [29]. Uma vez que o canal em estudo está em equilíbrio, serve a figura 3.13 de comparação para os casos estudados com presença de esporões junto ao extradorso da curva.

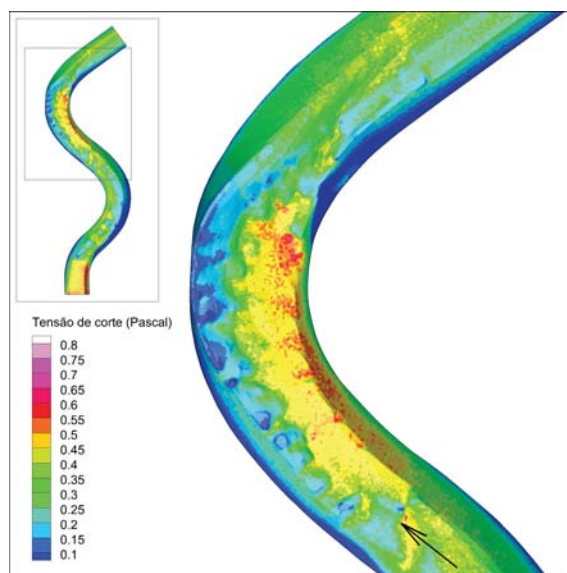


Figura 3.13: Tensão de corte nas paredes e fundo do canal na curva em estudo

As tensões de corte, como é possível observar na figura 3.13, são bastante superiores no intradorso curva, zona onde ocorreu menos erosão, tomando valores bastante baixos na zona do extradorso, zona onde ocorreu mais erosão.

## Capítulo 4

### Análise computacional na presença de esporões

#### 4.1 Introdução

A modelação do escoamento na presença de esporões no canal apresentado no capítulo 3 foi realizada com objetivo de avaliar as alterações no escoamento resultantes da sua presença, de modo a avaliar a sua eficiência na proteção das margens, aferindo neste caso, a influência da sua forma e orientação tendo por base os efeitos da configuração do fundo típicos de meandros em equilíbrio, ou seja, alturas de água elevadas no extradorso e alturas de água menores no intradorso. Foram desenvolvidos modelos tridimensionais, baseados no canal apresentado no capítulo 3, introduzindo esporões com diversas formas e ângulos com o escoamento, recorrendo mais uma vez ao *software ANSYS Fluent* para a realização das simulações. Para todas as simulações foi utilizado o modelo de turbulência  $k-\omega$  standard. Foram realizadas cinco simulações com esporões de diferentes formas ou orientações, introduzidos na secção de entrada da curva. Na simulação nº1 foi introduzido um esporão simples, de forma retangular e com ângulo de 90° com a margem. Este esporão será considerado o esporão padrão, que irá servir de modelo para comparação com os casos seguintes. O esporão da simulação dois está com uma orientação de 45° com a margem, orientado para montante. Na simulação 3 o esporão tem orientação para jusante, com um angulo com a margem de 135°. Na Quarta simulação é introduzido um esporão com a forma de  $L$ , com o mesmo ângulo do esporão padrão e por fim na quinta simulação o esporão tem forma de  $T$ , também este com um ângulo de 90° com a margem.

#### 4.2 Simulação 1 - Esporão padrão

A caso número 1 simula a introdução de um esporão simples, considerado como padrão, que prefaz um ângulo de 90° com a margem adjacente. O esporão é retangular, com uma largura de 4cm e o comprimento é de 1/4 da largura máxima do canal na secção onde foi introduzido, a secção de entrada da curva (9C). As dimensões do esporão têm como base os mesmos critérios de outros autores, que consideram a espessura entre 2 e 5cm e a largura do esporão de 1/4 do canal [30] [31]. A localização do esporão pode observar-se na figura 4.1.

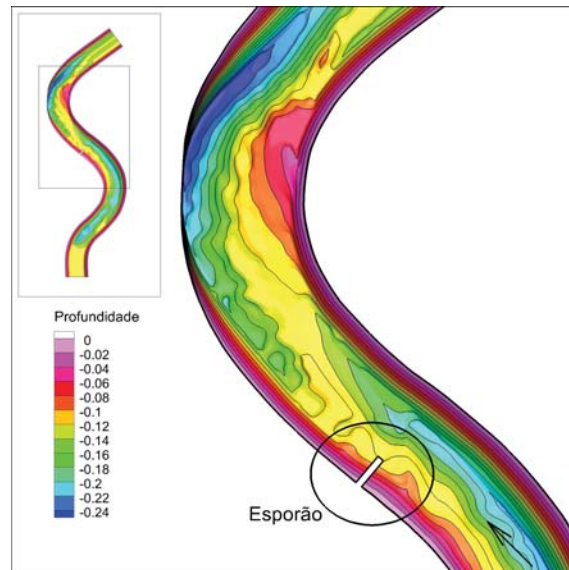


Figura 4.1: Localização do esporão no canal para a simulação 1 juntamente com a batimetria do leito

Segundo Fael 2008 [21], quando existe um obstáculo longo no escoamento,

*“... ocorre a separação da camada limite junto à margem, o que origina um vórtice de eixo vertical que se manifesta, por vezes, até à superfície livre do escoamento. O eixo deste vórtice inflecte e liga-se ao vórtice principal, acabando ambos por constituir uma única estrutura.”*

Este vórtice principal, bem como outros que se formam com a presença do obstáculo, nomeadamente, vórtice de eixo vertical a montante do obstáculo e vórtice de esteira, estão esquematizados na figura 4.2.

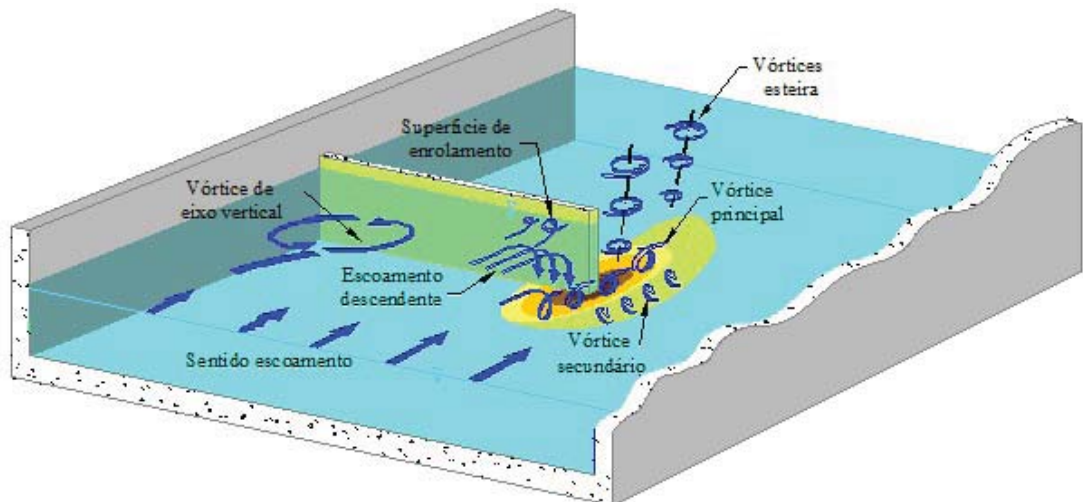


Figura 4.2: Estrutura do escoamento na presença de um obstáculo [21]

Segundo Fael [21], o obstáculo presente na figura 4.2, denomina-se por obstáculo padrão, pois é constituído por paredes planas verticais finas, alinhadas perpendicularmente à direção do escoamento. Sendo o esporão presente no caso em análise, um obstáculo ao escoamento, com estas mesmas características, é esperado o mesmo comportamento no campo de escoamento do obstáculo padrão considerado por Fael.

### 4.2.1 Campo de velocidades

Tal como aconteceu com o caso do canal em estudo sem qualquer esporão, também nesta simulação, foi possível obter valores para a velocidade longitudinal em diversas secções do canal em estudo e as respetivas linhas de corrente, como apresentado na figura 4.3. As secções analisadas foram secções à superfície (4.3a), a 3cm de profundidade (4.3b), a 6cm de profundidade (4.3c) e a 9cm de profundidade (4.3d).

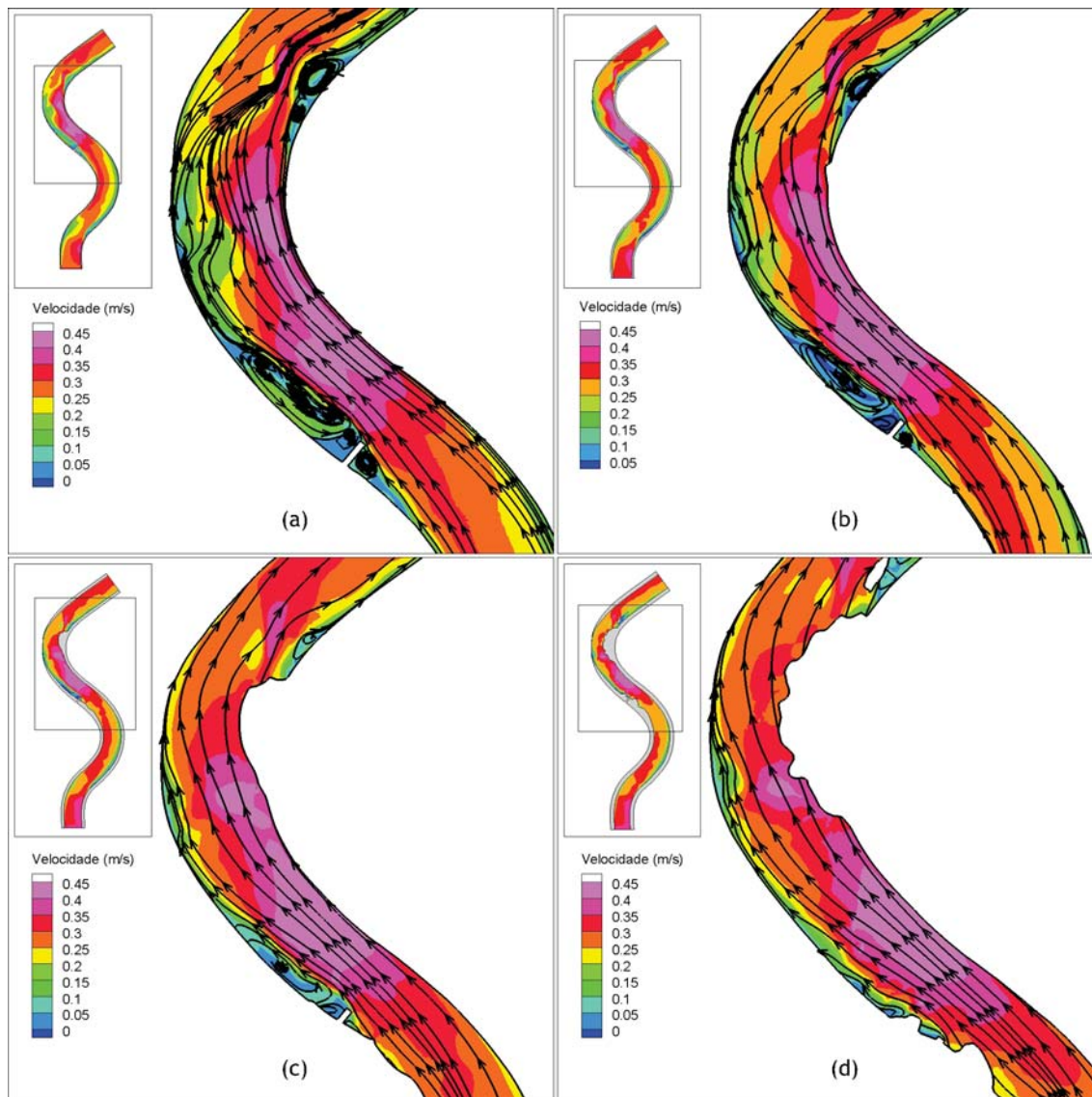


Figura 4.3: Velocidade do escoamento com esporão padrão, nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm;

Como é possível a figura 4.3, a montante do esporão está representado o vórtice de eixo vertical, mais visível nas figuras 4.3a e 4.3b, ou seja, mais próximo da superfície. Imediatamente a jusante aparecem os vórtices de esteira, estes já visíveis a uma profundidade maior, que originam uma zona de fluxo de retorno onde embora a velocidade seja de ordem mais baixa, existe grande quantidade de energia armazenada nos vórtices presentes.

Ao analisar a velocidade e comparando com a simulação sem a presença do esporão (apresentada

no capítulo 3), com a introdução do esporão no escoamento, existe um aumento significativo da velocidade no intradoso da curva, ou seja, junto da margem oposta ao esporão, pois o escoamento é defletido para essa zona justificando assim esse aumento. Quanto à região do extradoso da curva, observa-se um diminuir da velocidade, como já foi referido anteriormente, a jusante do esporão, voltando a valores mais próximos do caso sem esporões à medida que se avança na curva. Li [32] registou este mesmo efeito de fluxo de retorno, na análise que efetuou em 2013.

#### 4.2.2 Tensões de corte

No que diz respeito às tensões de corte, era esperado que, com o desvio do escoamento para a zona interior da curva resultante da introdução do esporão, existisse um aumento da tensão de corte nesse ponto da curva. Tal verificou-se e é possível observar na figura 4.4. Este aumento da tensão de corte, provoca uma maior probabilidade de existir erosão, modificando assim a batimetria do leito. Pelo contrário, junto ao extradoso da curva, registou-se um diminuir das tensões de corte resultantes da presença do esporão, o que poderá originar deposição de sedimentos nesta zona.

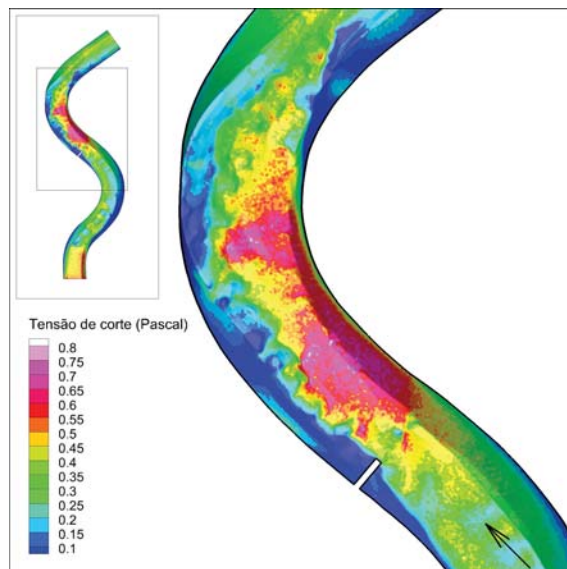


Figura 4.4: Tensões de corte nas paredes e fundo do canal na curva com esporão padrão

### 4.3 Simulação 2 - Esporão com orientação de 45°

No caso da simulação número 2 simula, é introduzido um esporão retangular com orientação de 45° no escoamento. Segundo Zhang e Nakagawa [10], este tipo de esporões é caracterizado por afastar o escoamento para longe do esporão. Na figura 4.5 está representada a localização do esporão na curva, sendo possível visualizar também a batimetria do leito.

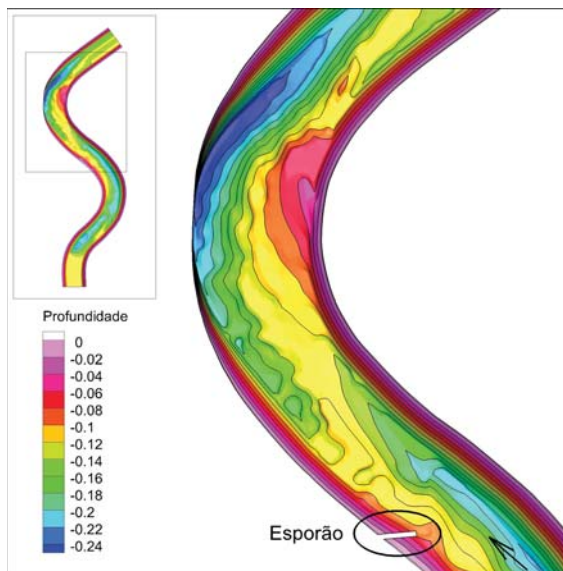


Figura 4.5: Localização do esporão no canal para a simulação 2 juntamente com a batimetria do leito

#### 4.3.1 Campo de velocidades

Ao analisar o campo de velocidades, também neste caso se optou apresentar os resultados em 4 secções, distanciadas de 3cm de altura entre elas, sendo a primeira secção à superfície, visível na figura 4.6a, a segunda a 3cm de profundidade, na figura 4.6b, a terceira a 6cm de profundidade, visível em 4.6c e por fim a 9cm de profundidade, na figura 4.6d.

Analisando o campo de velocidades e comparando com a simulação do esporão padrão, que tem um ângulo de 90° com a margem, observa-se que a velocidade não é tao elevada na região interna da curva, não sendo assim tão agresivo para o intradorso da curva. Ao mesmo tempo, este esporão consegue oferecer maior proteção para o extradorso da curva, sendo as velocidades bastante mais baixas, quando comparadas com o caso do subcapítulo 4.2, ao longo de toda a curva.

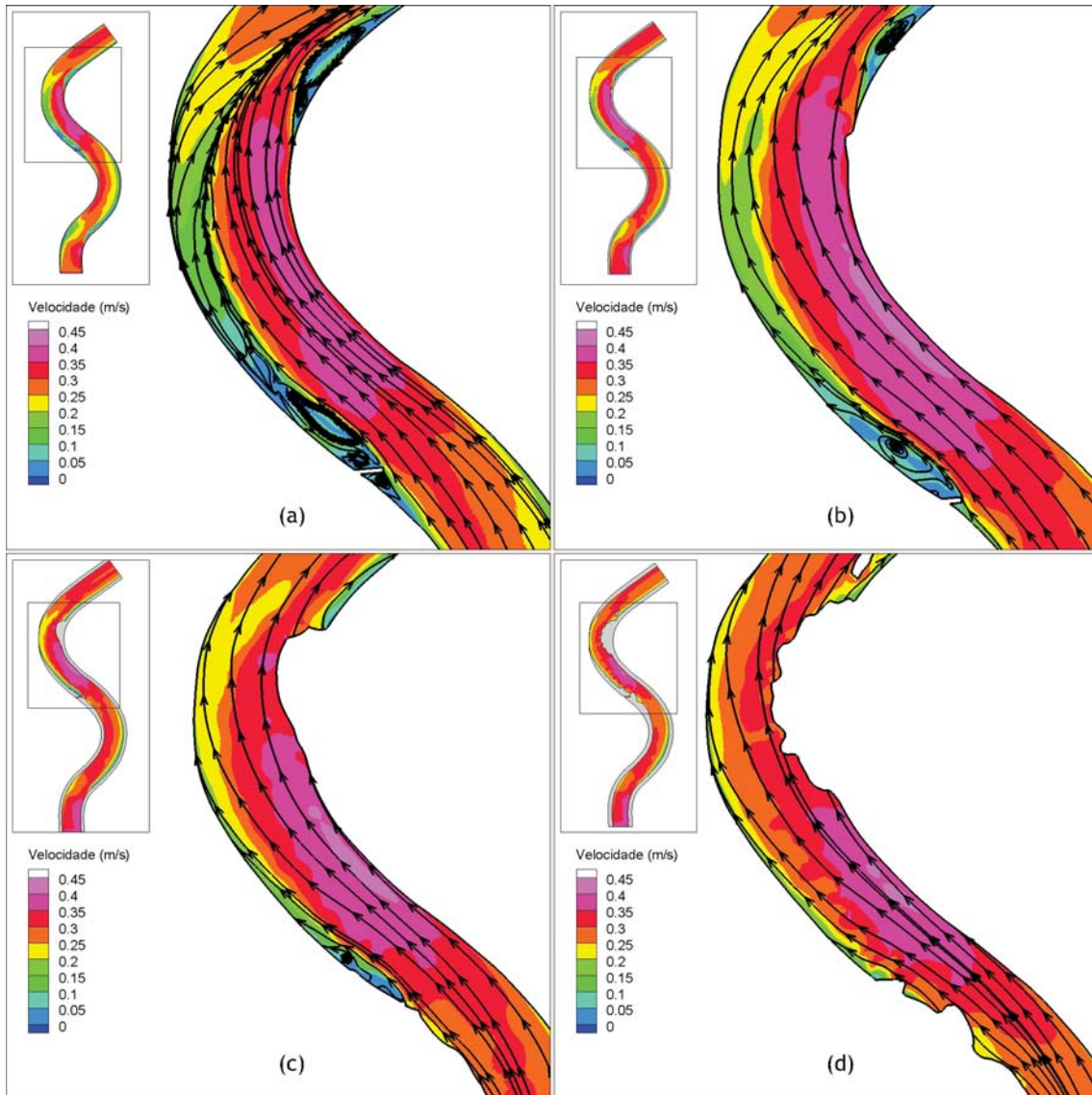


Figura 4.6: Velocidade do escoamento com esporão a 45°, nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm

### 4.3.2 Tensões de corte

Observando a figura 4.7, é possível concluir que este tipo de esporão causa muito menos impacto no intradorso da curva do que o esporão padrão. As tensões de corte no leito apenas se encontram um pouco mais altas nesta zona, comparativamente com o caso de não existir nenhum esporão, mas muito mais baixas do que na simulação do esporão padrão. Embora a redução da tensão de corte na zona exterior não seja muito acentuada, comparativamente com a redução verificada no caso do esporão padrão, estes valores de tensões de corte são bastante baixos, a jusante do esporão até cerca da secção central da curva.

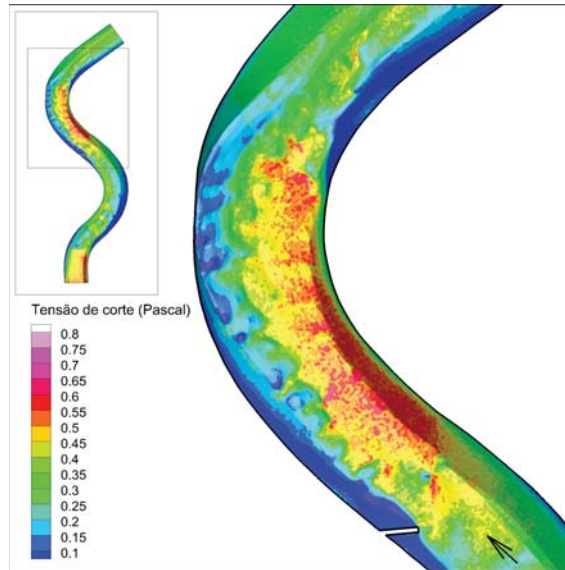


Figura 4.7: Tensões de corte no leito da curva com esporão orientado a montante

#### 4.4 Simulação 3 - Esporão com orientação de 135°

Depois de simulado o caso do esporão padrão em que este se encontra perpendicular à margem e um esporão orientado a montante, na simulação 3 o esporão está orientado a jusante com um ângulo de 135° com a margem. Segundo Zhang e Nakagawa [10], este é um esporão que redireciona o escoamento na direção da cabeça do esporão, logo não se espera que seja muito agressivo na margem interior da curva como aconteceu com o caso do esporão padrão. A localização do esporão é demonstrada na figura 4.8, bem como a batimetria do leito da curva.

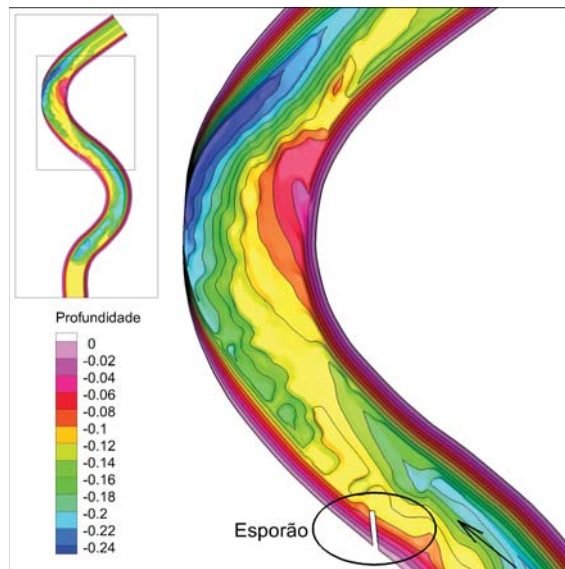


Figura 4.8: Localização do esporão no canal para a simulação 3 juntamente com a batimetria do leito

##### 4.4.1 Campo de velocidades

Este esporão, analisando a figura 4.9, dos três casos com variação de ângulo analisados, é o que provoda maior redução de velocidade no exterior da curva. Em contrapartida existe um

aumento, que embora não seja tão acentuado como o do esporão a  $90^\circ$ , continua a ser bastante significativo. O vórtice de eixo vertical, esquematizado na figura 4.2, é bastante pequeno, justificável com o facto de a sua inclinação não bloquear tanto o escoamento como nos casos anteriores. Também os vórtices de esteira, que geram a zona de fluxo de retorno, são inferiores aos observados nos outros dois casos de variação de ângulo.

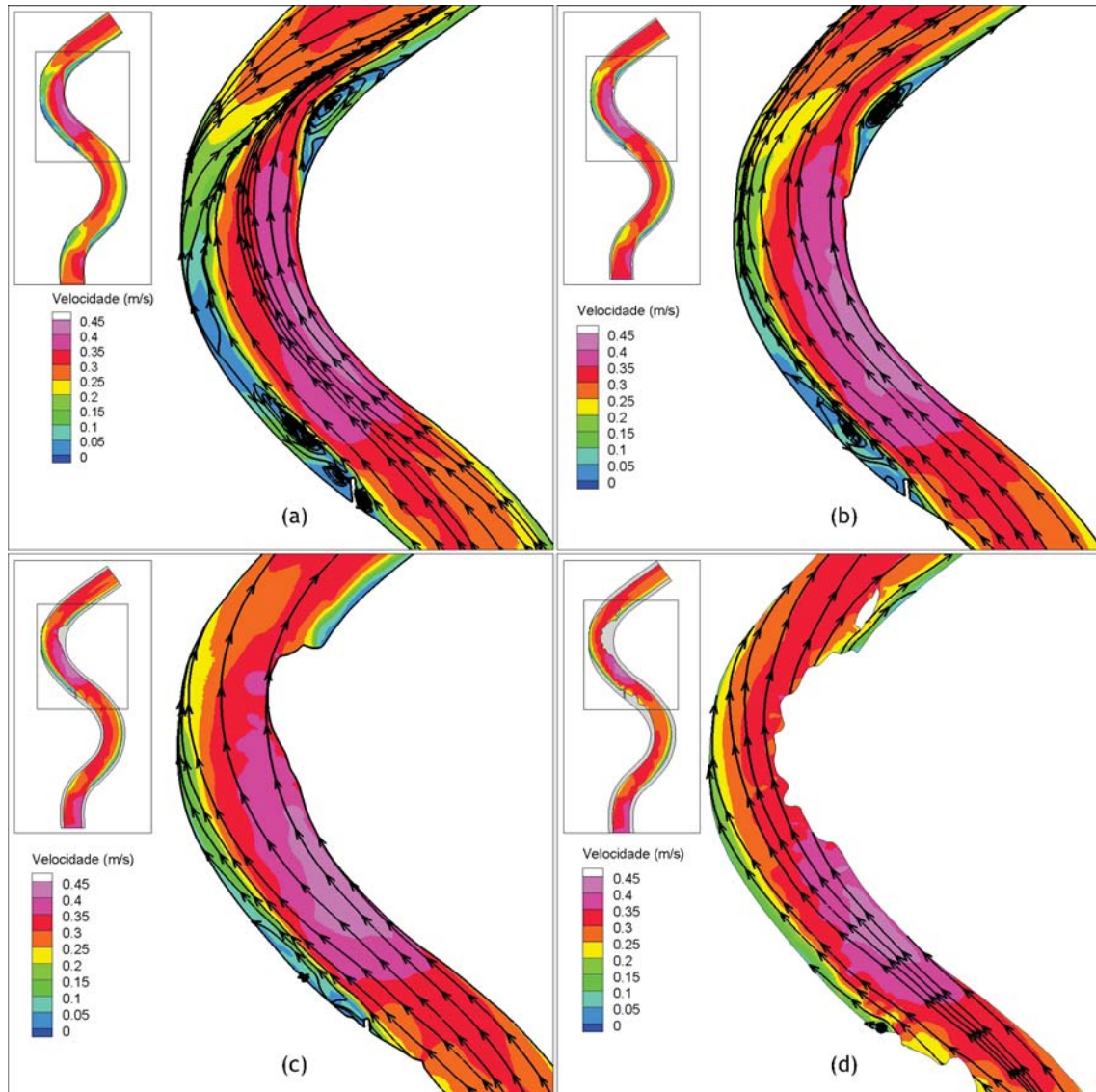


Figura 4.9: Velocidade do escoamento com esporão a  $135^\circ$ , nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm;

#### 4.4.2 Tensões de corte

As tensões de corte neste caso são superior ao caso do esporão orientado a montante, sem que tomem valores exagerados e inferiores ao caso do esporão padrão, mas é no extradorso da curva que este esporão funciona melhor, visto que as tensões de corte se mantêm baixas ao longo de grande parte da curva.

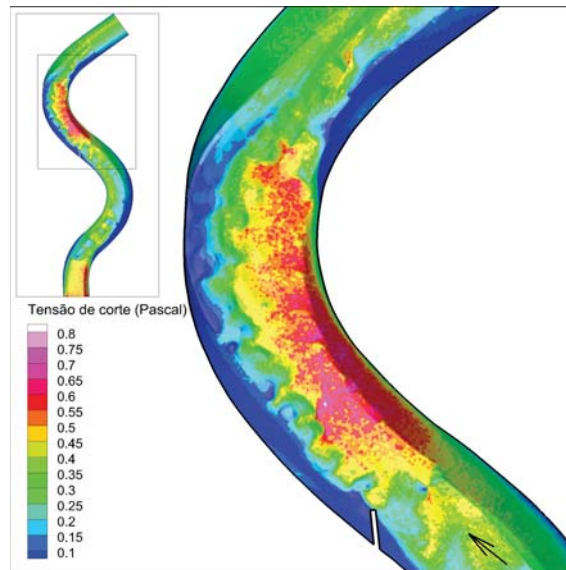


Figura 4.10: Tensões de corte no leito da curva com esporão orientado a jusante

## 4.5 Simulação 4 - Esporão em forma de L

Na Simulação 4, introduziu-se um esporão com forma  $L$  na secção de entrada da curva como apresentado na figura 4.11. Foi o primeiro dos casos onde a forma sofreu maior alteração, pois nos casos anteriores a variação era no ângulo que o esporão tinha com o escoamento.

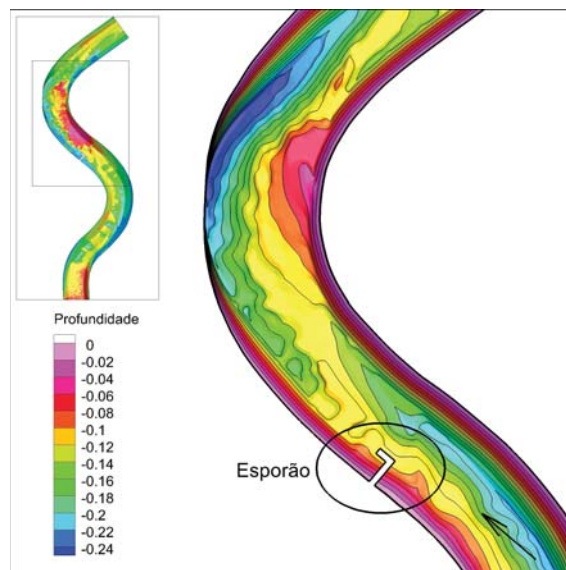


Figura 4.11: Localização do esporão no canal para a simulação 4 juntamente com a batimetria do canal

### 4.5.1 Campo de velocidades

Ao introduzir um esporão com forma de  $L$  no canal, o campo de velocidades comporta-se de forma bastante próxima do esporão padrão. A velocidade no intradorso da curva é ligeiramente mais baixa, mas sem que deixe de ser muito agressiva para o esta zona. Resultados indênticos foram obtidos por Abbasi 2011 [33]. Quanto á zona externa da curva, existe uma zona de fluxo de retorno ligeiramente mais pequena, pois a formação de vórtices de esteira é reduzida pela

forma da cabeça do esporão. A componente do  $L$  tangencial ao escoamento (cabeça do esporão), reduz a velocidade imediatamente a montante do esporão, mas no decorrer da curva acaba por ter tanta influência na proteção da margem.

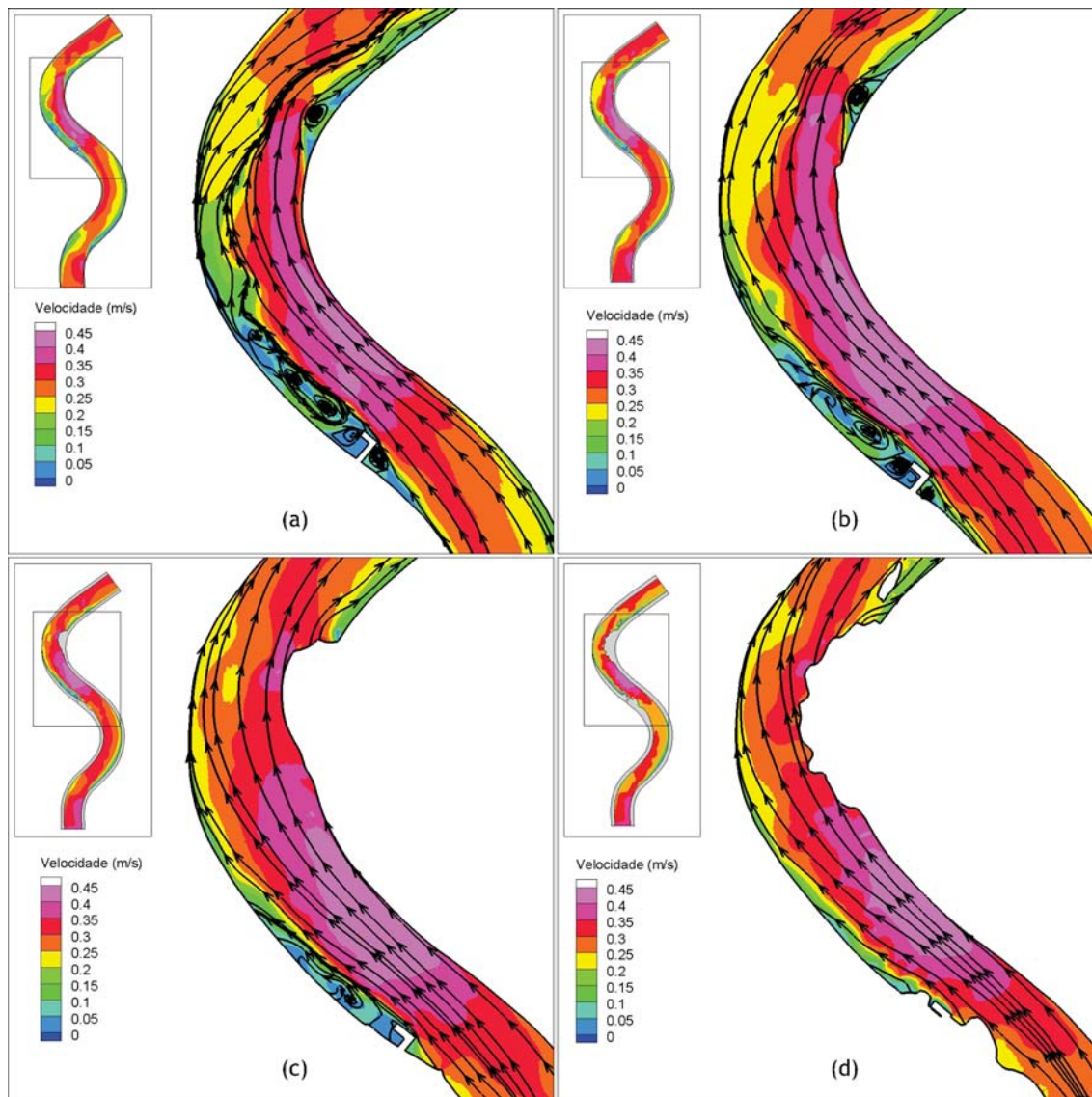


Figura 4.12: Velocidade do escoamento com esporão em forma de L, nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm;

#### 4.5.2 Tensões de corte

Neste caso do esporão em forma de  $L$  e como se pode observar na figura 4.13, as tensões de corte são elevadas no intradorso da curva, embora ainda antes de meio da curva, diminuem para valores bastante aceitáveis. Quanto ao extradorso, este esporão garante uma proteção bastante boa visto que as tensões de corte se mantêm bastante perto de zero até meio da curva.

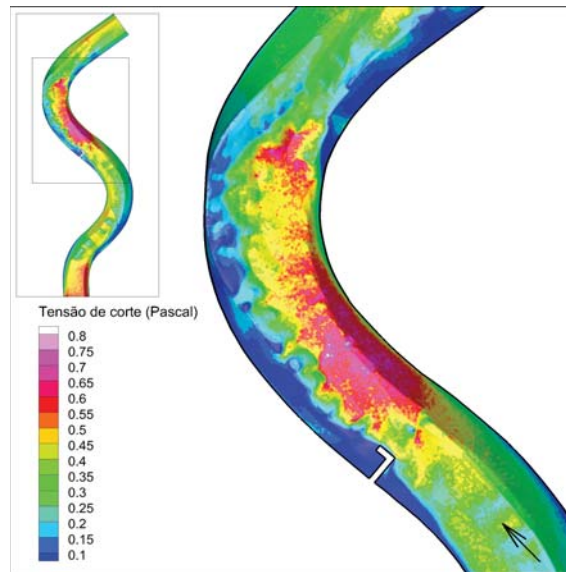


Figura 4.13: Tensões de corte nas paredes e fundo do canal na curva com esporão em forma de L

## 4.6 Simulação 5 - Esporão em forma de T

A caso número 5 simula a introdução de um esporão em forma de T. Na figura 4.14 está representada a localização do esporão na curva e respectivas alterações de fundo da curva.

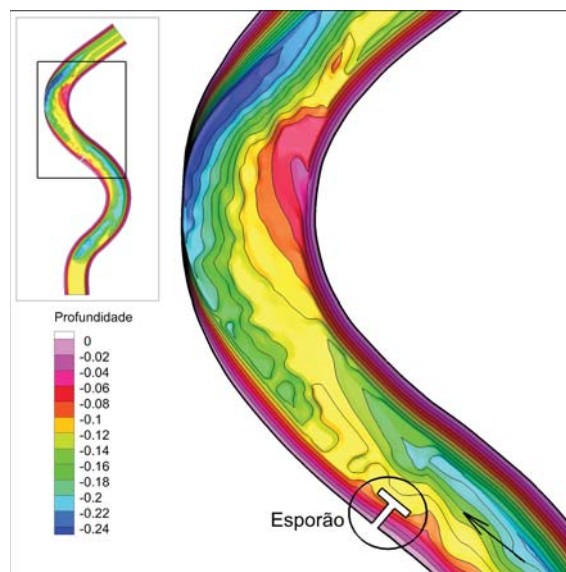


Figura 4.14: Localização do esporão no canal para a simulação do esporão T juntamente com a batimetria do leito

### 4.6.1 Campo de velocidades

Com o esporão em forma de  $T$ , o campo de velocidades melhorou em relação ao esporão  $L$  (que já tinha apresentado melhorias em relação ao esporão padrão). A velocidade no intradorso diminuiu em todas as secções analisadas, enquanto a velocidade no extradorso se manteve idêntica, com exceção da zona localizada a montante do esporão, onde se forma o vórtice de eixo vertical referido por Fael [21]. Neste caso, a pequena aba do  $T$ , a montante, garante

proteção adicional. O efeito do fluxo de retorno, bem como do vórtice de eixo vertical referido, que se apresenta na figura 4.15, foi estudado por Vaghefi et al.[34], chegando a estas mesmas conclusões.

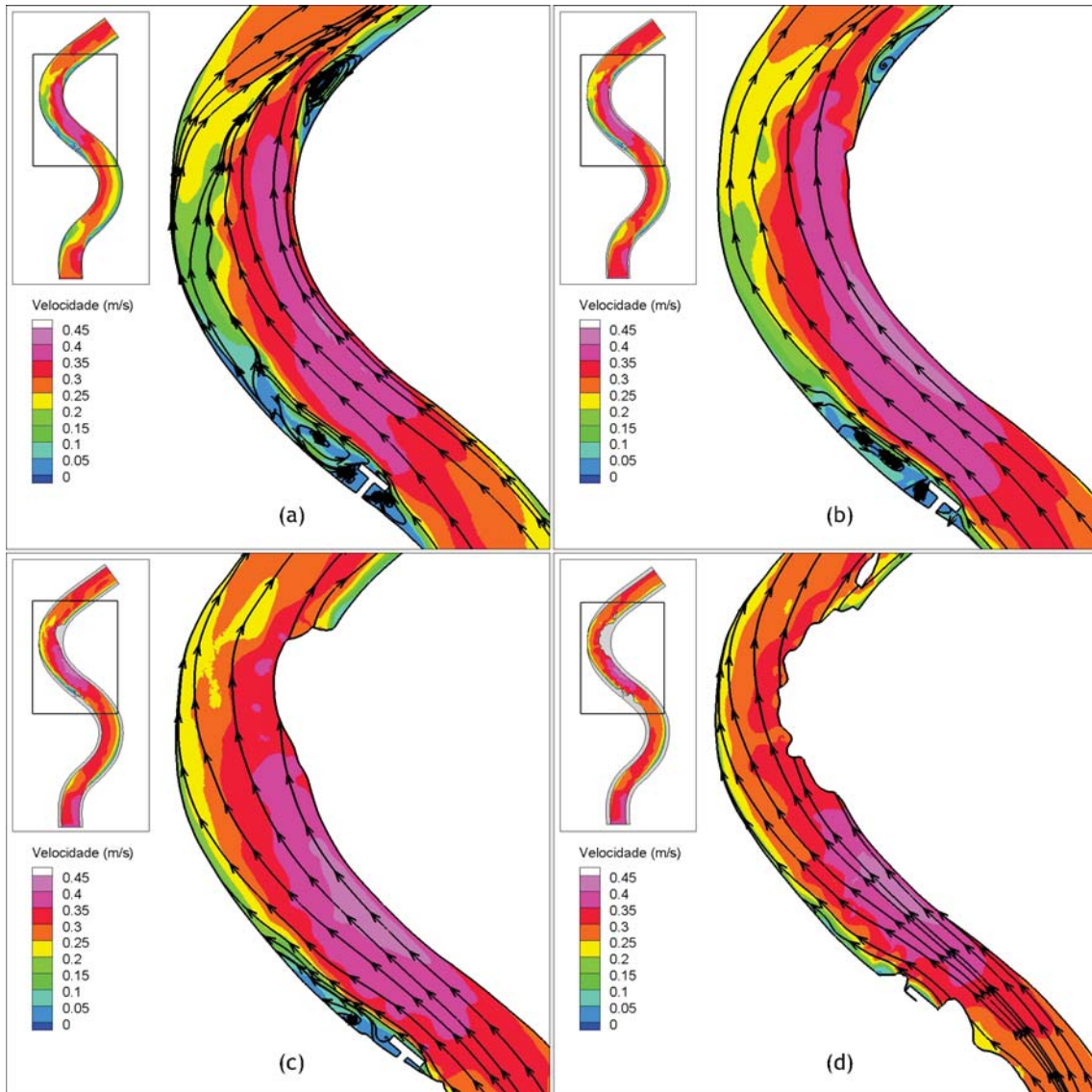


Figura 4.15: Velocidade do escoamento com esporão em forma de T, nas secções: (a) Superfície; (b) Profundidade = 3cm; (c) Profundidade = 6cm; (d) Profundidade = 9cm;

#### 4.6.2 Tensões de corte

Em relação às tensões de corte, embora este esporão seja mais largo que qualquer outro na cabeça, a sua forma permite que a tensão de corte se mantenha com valores relativamente baixos, dos mais baixos dos casos analisados, levando a querer que existirá pouca erosão com a introdução deste esporão. Ao observar a figura 4.16, observam-se poucas zonas acima dos 0.65 Pa, o que não acontece com os outros casos.

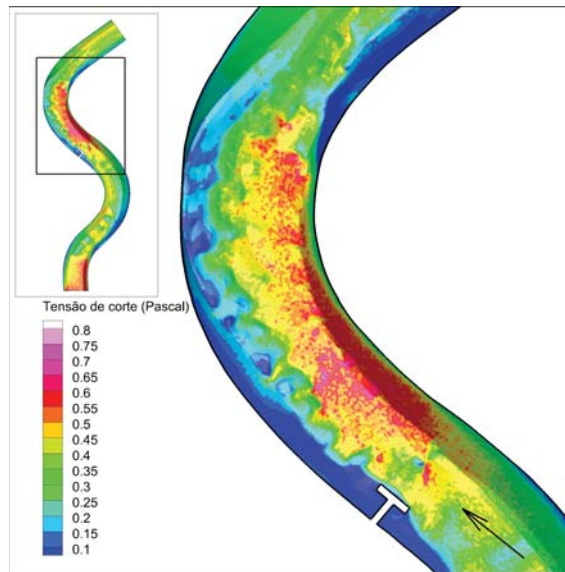


Figura 4.16: Tensão de corte nas paredes e fundo do canal na curva com esporão em forma de T



## Capítulo 5

### Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

#### 5.1 Conclusões

O estudo apresentado na presente dissertação versa sobre a modelação de um canal hidráulico meandrizado, com esporões de diferentes formas e orientações, para averiguar as diferenças no escoamento provocadas pela inserção destes.

Numa primeira fase, para validação do modelo numérico e respetivos valores obtidos, foi realizada a simulação do canal hidráulico sem qualquer esporão, comparando os resultados com valores obtidos experimentalmente num modelo físico. Os resultados numéricos foram bastante bons para os modelos de turbulência  $k-\omega$ , estando muito próximos daqueles registados experimentalmente, podendo afirmar-se que, a modelação numérica de canais é uma alternativa à construção de modelos físicos, visto a diferença mínima na comparação dos resultados.

Após a validação do modelo, foram realizados cinco simulações com esporões no canal onde foram inseridos à entrada do extradorso da curva, de maneira a conseguir obter resultados da sua influência na curva para jusante. As três primeiras simulações incidiram sobre a análise do ângulo que o esporão fazia com o escoamento e as conclusões foram as seguintes:

- O caso que apresentou melhores resultados foi o caso do esporão orientado a 45° para montante. Este esporão foi o que provocou menor aumento na velocidade no intradorso da curva ao mesmo tempo que garantiu uma proteção na zona exterior até cerca da secção central da curva, o que apenas para um esporão é um resultado ótimo. Também as tensões de corte foram as mais baixas dos três casos em que foi analisada a influência do ângulo;
- Na simulação em que o esporão padrão, normal ao sentido do escoamento, notou-se um aumento significativo da velocidade no intradorso da curva, devido ao seu posicionamento, que desviava o escoamento para essa mesma área. Quanto à zona exterior, foi o caso que registou menos eficiência na proteção da margem, uma vez que a diminuição da velocidade não foi assim tão significativa, reduzindo apenas em cerca de 20 % a jusante da curva. As tensões de corte apresentaram o mesmo comportamento da velocidade, sendo bastante maiores no intradorso e relativamente baixas no extradorso;
- O esporão orientado a jusante, no intradorso da curva registou valores compreendidos entre os valores registados pelo esporão tipo e o esporão orientado para montante. Já na zona externa foi aquele que garantiu maior diminuição na velocidade no extradorso da curva, sendo também aquele que tem uma zona de fluxo de retorno maior. As variações das tensões de corte foram da mesma escala das variações de velocidade.

No caso do esporão L, as velocidades no exterior da curva são da mesma ordem de grandeza daquelas obtidas do caso do esporão padrão, normal ao escoamento, originando um aumento considerável na velocidade interior mas não são tão elevadas como no esporão padrão. A zona de fluxo de retorno é sensivelmente igual a 1/4 do comprimento da curva, mas este esporão

oferece maior proteção da margem imediatamente a jusante do esporão.

Para concluir, no caso do esporão *T*, a velocidade, em todas as zonas da curva, é menor do que no caso do esporão *L*, existindo um padrão nos resultados com a introdução de abas num esporão padrão. Os resultados melhoram significativamente com a introdução de uma aba orientada a montante (Caso do esporão *L*) e apresentam ainda melhores resultados com a introdução de outra aba, prefazendo a forma *T* deste caso analisado. Também nas tensões de corte, este caso foi extremamente eficiente, apresentando valores favoráveis à proteção do fundo do leito.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Na sequência do trabalho realizado na presente dissertação, e de modo a melhor compreensão do efeito que a introdução de um esporão tem no escoamento, existe uma necessidade de dar continuidade a este trabalho, pelo que se propõe:

- Realizar simulações com mais formas de esporões;
- Testar casos onde exista um campo de esporões, ao invés de apenas um, pois ao colocar vários esporões na mesma curva eles vão trabalhar em conjunto aumentando assim a proteção das margens;
- Averiguar o efeito que a introdução de esporões tem nas curvas seguintes;
- Realizar testes onde o fundo é móvel, ou seja, erodível. Esta última proposta é a mais importante de todas pois, com a introdução de qualquer esporão no canal, a sua batimetria vai alterar devido à erosão provocada pelo esporão.

## Bibliografia

- [1] J. F. Kennedy, *Hydraulic Relations for Alluvial Streams*. New York: Sedimentation Engineering, 1977.
- [2] J. R. M. Silva, *Reflexão sobre a Hidráulica Fluvial. Em Memória das Vítimas do Desastre da Ponte de Entre-Rios*. Ingenium, 2001.
- [3] J. F. Mount, *California Rivers and Streams*. Paperback, 1995.
- [4] R. Garcia, *Hydraulic Design Manual*. Texas Department of Transportation (TxDOT), 2016.
- [5] S. Gregory, L. Ashkenas, D. Oetter, R. Wildman, P. Minear, S. Jett, and K. Wildman, "Willamette River Basin Planning Atlas: Trajectories of Environmental and Ecological Change," Corvallis, pp. 32-33, 2002.
- [6] R. A. Kuhnle, Y. Jia, and C. V. Alonso, "Measured and Simulated Flow Near Spur Dikes," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 2008, pp. 916-924, 2008.
- [7] S. Karaki, "Hydraulic Model Study of Spur Dikes for Highway Bridge Openings," Fort Collins, 1959.
- [8] J. B. Herbich, "Spur Dikes Prevent Scour at Bridge Abutment," Bethlehem, Pensilvânia, 1966.
- [9] JICA-DPWH, "Technical standards and guidelines for design of flood control structures," 2010.
- [10] H. Zhang and H. Nakagawa, "Scour around Spur Dyke : Recent Advances and Future Researches," *Annals of Disas. Prev. Res., Kyoto Univ., Inst*, no. Annals of Disas. Prev. Res., Kyoto Univ., Inst. 51B, pp. 633-652, 2008.
- [11] J. Anderson, "Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications," 1995.
- [12] FlowScience, "Flow 3D - FLOW SCIENCE, INC," 2016. [Online]. Available: <https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2014/03/dam-cfd-analysis.jpg>
- [13] Fluent Inc., *Fluent 6.3 User's Guide*. Fluent Inc., 2006.
- [14] J. Souza, L. Oliveira, J. Azevedo, I. Soares, and M. Mata, "Uma revisão sobre a turbulência e a sua modelagem," pp. 21-41, 2011.
- [15] P. R. Spalart and S. R. Allmaras, "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows," Reno, 1992.
- [16] Ansys Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide*, 15th ed., I. SAS IP, Ed. Canonsburg: ANSYS Inc., 2013.
- [17] V. Yakhot and S. A. Orszag, "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique," *Physics of Fluids*, vol. A4, pp. 1510-1520, 1992.
- [18] D. C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD," La Canada, California, 1998.
- [19] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605, 1994.

- [20] S. A. Vicario, “Caracterización del flujo en un canal meandriforme - Trabajo fin de grado para la obtención del Grado en Ingeniería Civil. Mención Hidrología,” Salamanca, 2016.
- [21] C. Fael, “Erosões localizadas junto de encontros de pontes e respectivas medidas de protecção,” Dissertação apresentada para a Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, 2008.
- [22] C. Maliska, “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional,” 2004.
- [23] J. H. Ferziger and Peric Milovan, “Computational Methods for Fluid Dynamics,” 1997.
- [24] J. W. Löhner and Sons, “Applied CFD Techniques: An Introduction based on Finite Element methods,” 2001.
- [25] M. N. Abhari, M. Ghodsian, M. Vaghefi, and N. Panahpur, “Experimental and numerical simulation of flow in a 90 degree bend,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 21, no. 3, pp. 292-298, 2010.
- [26] M. Vaghefi, M. Akbari, and A. R. Fiouz, “An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: Secondary flow and bed shear stress,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 1582-1593, 2016.
- [27] K. Blanckaert, “Secondary currents measured in sharp open-channel bends,” in *International Conference on Fluvial Hydraulics*. Louvain-la-Neuve: International Conference on Fluvial Hydraulics, 2002, pp. 117-125.
- [28] A. Gholami, A. A. Akhtari, Y. Minatour, H. Bonakdari, and A. A. Javadi, “Experimental and numerical study on velocity fields and water surface profile in a strongly-curved 90 degree open channel bend,” *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 8, no. 3, pp. 447-461, 2014.
- [29] A. H. Cardoso, *Hidráulica Fluvial*, F. C. Gulbenkian, Ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.
- [30] J. Yazdi, H. Sarkardeh, H. M. Azamathulla, and A. A. Ghani, “3D simulation of flow around a single spur dike with free-surface flow,” *International Journal of River Basin Management*, vol. 8, no. 1, pp. 55-62, 2010.
- [31] Y. Zhou, M. Michiue, and O. Hinokidani, “A numerical method of 3D flow around submerged spur-dikes,” *Journal of Hydraulic Engineering JSCE*, vol. 44, pp. 605-610, 2000.
- [32] G. Li, L. Lang, and J. Ning, “3D Numerical Simulation of Flow and Local Scour around a Spur,” *IAHR World Congress*, no. 1990, 2013.
- [33] S. Abbasi, A. Kamanbedast, and J. Ahadian, “Numerical Investigation of Angle and Geometric of L-Shape Groin on Flow and Erosion Regime at River Bends,” *World Applied Sciences journal*, vol. 15, pp. 279-284, 2011.
- [34] M. Vaghefi, A. Ahmadi, B. Faraji, M. Javan, and A. Eghbalzadeh, “Numerical Study of Flow Patterns around T shape spur dike And Support Structure,” *Journal of River Engineering*, vol. 2, no. 5, 2014.