



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Estudo da Influência do Espaçamento dos Esporões no Campo de Escoamento - Modelação Numérica

(Versão final após defesa pública)

João Libério Figueiredo Alves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(Ciclo de estudos integrado)

Orientadora: Prof. Doutora Cristina Maria Sena Fael

Covilhã, outubro de 2016

Dedicatória

Aos meus pais e irmã, por ser quem sou...

Agradecimentos

A dissertação que aqui se apresenta marca o culminar do meu ciclo de estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Reservo por isso umas palavras de agradecimento a todos os que me acompanharam ao longo deste percurso.

À Professora Cristina Fael, começo por agradecer todo o apoio, empenho, disponibilidade e conhecimento transmitido ao longo do último ano, sem os quais a realização deste trabalho não seria possível.

Agradeço também a todos os meus amigos e colegas com quem partilhei os bons momentos e vivenciei os menos bons.

Uma palavra de gratidão a todos os professores e técnicos desta instituição e em particular a todos os que me auxiliaram neste ciclo de estudos.

Por fim, mas não em último, a todos os meus amigos e família que me acompanham sempre, em particular aos meus pais e irmã.

Resumo

O conhecimento do comportamento do escoamento é fundamental no estudo de soluções para proteção de margens, controlo de escoamentos e inundações. A implementação de campos de esporões tem-se verificado como uma medida adequada de prevenção de erosão, sendo essencial o estudo da interação destas estruturas com o escoamento.

Nesta dissertação pretende-se estudar com recurso a simulação numérica, a influência do campo de esporões no comportamento do escoamento no canal meandriforme existente no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior.

Definiu-se como objetivo avaliar as alterações impostas no escoamento quando adotado um campo de esporões na proteção da margem exterior de uma curva. Inicialmente, procedeu-se à construção e validação de um modelo numérico, tendo-se testado os modelos de turbulência $k-\varepsilon$ padrão, $k-\varepsilon$ RNG, $k-\omega$ padrão e $k-\omega$ SST, de entre os quais, o modelo $k-\omega$ padrão mostrou uma adequada aproximação ao escoamento real.

A validação do modelo teve por base os resultados experimentais obtidos por Vicario (2016) nesse canal. Após a validação do modelo, estudou-se a influência do número de esporões no comportamento do escoamento, tendo em consideração a sua orientação, espaçamento e ângulo de mergulho.

Das simulações realizadas no presente estudo, concluiu-se que os esporões mergulhantes orientados a montante sofrem menor efeito erosivo na sua extremidade e provocam menor desvio do escoamento para o intradorso da curva. Desta forma, os esporões mergulhantes e orientados para montante mostraram-se viáveis para o caso de estudo uma vez que dois esporões permitiram a proteção integral da margem exterior sem um agravamento das condições de escoamento para as curvas de jusante.

Palavras-chave: Canal Meandriforme, Escoamento Turbulento, Esporões, CFD,
Simulação Numérica

Abstract

The knowledge of the flow field behaviour is fundamental for the study for riverbanks protection solutions, as well as flow field and flood controls. The implementation of spur dikes fields has proven to be a good erosion preventive measure, being essential the study of the interaction between these structures and the flow field itself.

In this dissertation is intended to study, the influence of the spur dikes fields on the flow field channel with a meandering form, which is available at the Hydraulic Laboratory of the Architecture and Civil Engineering Department of the University of Beira Interior. For this study, a numerical simulation has been used.

The objective of this study is to analyse the flow field behaviour understanding when a spur dikes field is applied to protect the external margin of the curve. The development and validation of a model took place by testing turbulence models *k-ε standard*, *k-ε RNG*, *k-ω standard* and *k-ω SST*, among which, *k-ω standard* has shown the best proximity to the real flow field results.

The model validations had, as base reference, the experimental results obtained by Vicario (2016) on the above cited channel. Afterwards model validation, the influence of the number of spur dikes on the drainage behaviour has been studied considering their orientation, space and the plunge angle.

From all performed simulations in this study, it can be concluded that, the spur dikes plunging towards the centre the channel presenting an upstream orientation suffer lower erosion effect on their extremity and cause lower flow field deviation for inner curve. Therefore, these same spur dikes revealed to be the most suitable ones once, two were enough to protect all external riverbank without compromising the flow for the downstream curves.

Keywords: Meandering Channel, Turbulent Flow, Spur Dikes, CFD, Numerical Simulation

Índice

1.Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e Justificação	2
1.3 Organização da Dissertação	3
2.Revisão Bibliográfica	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Modelação Numérica de Fluidos	5
2.3 Esporões.....	6
2.3.1 Enquadramento	6
2.3.2 Soluções de esporões.....	7
2.3.3 Posicionamento em Planta	8
2.3.4 Vorticidade Associada	9
2.4 Lei Universal da Parede.....	11
2.4.1 Subcamada Viscosa	12
2.4.2 Subcamada Turbulenta	13
2.4.3 Perfil de Velocidades Junto de uma Superfície Sólida	13
2.5 Equações de Navier-Stokes.....	14
2.5.1 Equações de Conservação da Massa.....	15
2.5.2 Equações de Quantidade de Movimento	15
2.6 Modelos de Turbulência	16
2.6.1 Large Eddy Simulation – LES.....	16
2.6.2 Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS.....	17
2.7 Variáveis Características de Turbulência	20
2.8 Método dos Volumes Finitos	21
2.8.1 Malhas Numéricas.....	22
3.Modelação Numérica do Canal Meandriforme	27
3.1 Introdução.....	27
3.2 Canal Meandriforme	27
3.3 Metodologia Numérica	30
3.4 Simulações Experimentais – Casos Simplificados	31

Estudo da Influência do Espaçamento dos Esporões no Campo de Escoamento
Modelação Numérica.

3.4.1	Geometria do Problema	31
3.4.2	Malha.....	32
3.4.3	Modelo de Turbulência	34
3.4.4	Análise de Resultados.....	35
3.5	Validação do Modelo.....	37
3.5.1	Geometria do Problema	38
3.5.2	Malha.....	38
3.5.3	Modelo de Turbulência	38
3.5.4	Análise de Resultados.....	39
3.6	Caso de Estudo - Esporões	44
3.6.1	Pré-dimensionamento do Campo de Esporões.....	44
3.6.2	Análise e Discussão de Resultados	46
4.	Conclusões e propostas de trabalhos futuros.....	51
	Bibliografia	53

Lista de Figuras

Figura 2.1- Exemplo de Simulação Numérica de Fluidos – CFD, recorrendo ao ANSYS [2].	2
Figura 2.1- Campo de esporões [6].	8
Figura 2.2- Dimensão e Espaçamento de Esporões vs Vórtices Formados [11], [12].	10
Figura 2.3- Subcamadas viscosa, turbulenta e zona de transição [13].	11
Figura 2.4- Perfil de velocidade junto a uma superfície sólida [14].	14
Figura 2.5- Tipos de Malhas [3], [16].	22
Figura 2.6- Permutador de calor – Adaptado [17].	23
Figura 2.7- Malha ortogonal com 40x15 células – Adaptado [17].	23
Figura 2.8- Malha não ortogonal com 40x15 células – Adaptado[17].	23
Figura 2.9- Campo de velocidades obtido com a malha ortogonal – Adaptado [17].	24
Figura 2.10- Campo de velocidades obtido com a malha não ortogonal – Adaptado [17].	24
Figura 2.11- Malha estruturada vs. malha não estruturada [18].	25
Figura 3.1- Canal Meandriforme – Planta.	27
Figura 3.2- Canal com fundo em equilíbrio (erodido) - Laboratório de Hidráulica – DECA.	28
Figura 3.3- Secção simétrica (S_s), canal com fundo plano.	28
Figura 3.4- Secção central da segunda curva (S_c)	29
Figura 3.5- Secção de entrada do canal (S_o)	29
Figura 3.6- Estabilização do caudal na entrada do canal[19].	30
Figura 3.7- Metodologia experimental - Fluxograma	31
Figura 3.8- Segunda curva com fundo em equilíbrio - Planta.	31
Figura 3.9- Modelo simplificado – Planta	32
Figura 3.10- Malhas não estruturadas: a) não uniforme; b) uniforme de 15 mm; c) uniforme de 12 mm; d) uniforme de 10 mm. Secção de montante da curva 2 (S_m).	33
Figura 3.11- Magnitude da velocidade para volume de controlo de 15 mm.	35
Figura 3.12- Magnitude da velocidade para volume de controlo de 12 mm.	36
Figura 3.13- Magnitude da velocidade para volume de controlo de 10 mm - convergência 1×10^{-3} .	36
Figura 3.14- Promenor de linhas de corrente para o volume de controlo de 10 mm - convergência 1×10^{-3} .	36
Figura 3.15- Magnitude da velocidade para volume de controlo de 10 mm; Promenor de linhas de corrente - convergência 1×10^{-5} ;	37
Figura 3.16- Geometria do problema – Validação do modelo computacional.	38
Figura 3.17- Esforço computacional.	39
Figura 3.18- Validação da malha - Perfil de velocidade: a) Longitudinal; b) Transversal; c) Vertical	41
Figura 3.19- Validação do modelo - Perfil de velocidade: a) Longitudinal; b) Transversal; c) Vertical	42
Figura 3.20- Linhas de corrente, secção central: a) Modelação; b) experimental [19].	43
Figura 3.21- Linhas de corrente teóricas nas secções de inflexão e central de um meandro - Adaptado de Knighton (1998). [19]	43
Figura 3.22- Linhas de corrente: a) Secção de entrada da curva (S_m); b) Secção de saída na curva (S_j).	44
Figura 3.23- Recomendação para proteção de margens exteriores em curvas (USACE) [20].	45
Figura 3.24- Curva sem esporões: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.	46

Figura 3.25- Esporão normal e não mergulhante: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.	46
Figura 3.26- Esporão normal e mergulhante 15º: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.	47
Figura 3.27- Esporão orientado a montante 12º e mergulhante 15º: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.	47
Figura 3.28- Campo de dois esporões: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.	48
Figura 3.29- Campo de três esporões: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.	48
Figura 3.30- Linhas de corrente ao longo das duas primeiras curvas do canal.....	49
Figura 3.31- Evolução do andamento das linhas de corrente e velocidades para os casos: a) um esporão; b) dois esporões; c) três esporões.	50

Lista de Tabelas

Tabela 1- Correlação entre as geometrias do canal e esporões	9
Tabela 2- Malhas experimentais, não estruturadas – Curva 2.	34
Tabela 3- Malhas experimentais, não estruturadas – Modelo simplificado.....	34
Tabela 4- Condições de fronteira – Modelo simplificado.	35
Tabela 5- - Malhas não estruturadas – Validação do modelo.	38
Tabela 6- Condições de fronteira – Validação do modelo	39
Tabela 7- Valores para comprimento (L) e espaçamento entre esporões (S).	45

Lista de Acrónimos

CFD	Computacional Fluid Dynamics
DNS	Directe Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
MVF	Método dos Volumes Finitos
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RNG	Renormalization Group Method, Modelo k- ϵ RNG
RSM	Modelos de tensões de Reynolds
SST	Shear Stress Transport, Modelo k- ω SST
UBI	Universidade da Beira Interior

Lista de Símbolos

B	Largura do canal na superfície do escoamento
b	Largura do canal na base do escoamento
C_μ	Constante de turbulência
Dh	Diâmetro hidráulico
h	Altura do escoamento
I	Intensidade turbulenta
k	Energia cinética de turbulência
L	Comprimento do esporão
l	Comprimento característico da turbulência
Re	Número de Reynolds
So	Secção de entrada do canal
Sc	Secção central da segunda curva
Sj	Secção de jusante da segunda curva
Sm	Secção de montante da segunda curva
U	Magnitude da velocidade
u	Velocidade média do escoamento
\bar{u}'^2	Desvio quadrático médio da flutuação da velocidade
u_*	Velocidade de atrito
u_i	Velocidade segundo a direção "i"
ν_T	Viscosidade cinemática turbulenta
ε	Dissipação turbulenta
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ν	Viscosidade cinemática do fluido
ρ	Massa volúmica do fluido
τ_w	Tensão de corte

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Atualmente são muitos os problemas verificados nas zonas costeiras e frentes ribeirinhas devido à incompatibilidade entre os elementos da construção e os fenómenos hidrodinâmicos verificados nos escoamentos e marés. As estruturas de proteção de margens devem garantir a diminuição da erosão por ação do escoamento, permitindo controlar onde se dá a erosão e a deposição de sedimentos.

Considera-se que a erosão é um fenómeno intrínseco a qualquer rio, dependendo das condições de escoamento e da capacidade das margens se moldarem ao escoamento. Um quadro de erosão agravada pode provocar degradação do terreno, instabilidade fluvial, deslizamentos de solo e, nas piores circunstâncias, pôr em risco a estabilidade de edifícios ou vias de comunicação [1].

Ao longo do tempo, a forma mais viável de estudar os problemas associados a escoamentos passou por definir modelos físicos representativos do problema, muitas vezes inviabilizados devido ao elevado custo monetário resultando na adoção de soluções menos adequadas. Atualmente, a modelação numérica apresenta-se como uma alternativa no âmbito da hidráulica e mais concretamente na engenharia de recursos hídricos no que diz respeito a estudos em rios, canais, lagos, estuários e zonas costeiras. Os modelos numéricos deram lugar a um novo conceito na mecânica de fluidos, a Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), que tem por base as equações governativas da mecânica dos fluidos. Estes modelos têm como ponto de partida representar o fenómeno do movimento, baseando-se nos princípios da conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento.

Num escoamento para além dos fenómenos relativos ao movimento verificam-se interações complexas entre o fluido e corpos sólidos que levaram à formulação de equações que regem a dinâmica de fluidos, tais como as equações de Navier-Stokes relativas a fluidos viscosos e a equações de Euler para fluidos invíscidos. Para fluidos de viscosidade reduzida em determinadas condições de escoamento é comum considerar-se a hipótese simplificativa de um fluido ideal (sem viscosidade) podendo-se aplicar a equação de Euler. A solução das equações de Navier-Stokes obtida por resolução direta apenas é possível para casos simples, como escoamentos em regime laminar (com número de *Reynolds* pequenos) comum em normalmente para escoamentos com fluidos de grande viscosidade ou pequenas velocidades. No que diz respeito a simulações de escoamentos turbulentos surgem dificuldades na caracterização analítica do escoamento, tendo surgido modelos de turbulência que permitem uma aproximação por resolução numérica cujo desvio depende da capacidade computacional. Nestes modelos, o programa recorre a expressões empíricas porque o número de incógnitas é

superior ao número de equações disponíveis, sendo necessário especificar condições de fronteira adicionais como variáveis características da turbulência. Em escoamentos turbulentos, a simples interação do fluido com o contorno sólido (parede) afeta a velocidade e direção do escoamento cujas consequências são explicadas pela lei universal da parede.

Atualmente a simulação numérica de escoamentos baseia-se em três métodos distintos, RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), LES (*Large Eddy Simulation*) e DNS (*Direct Numerical Simulation*).

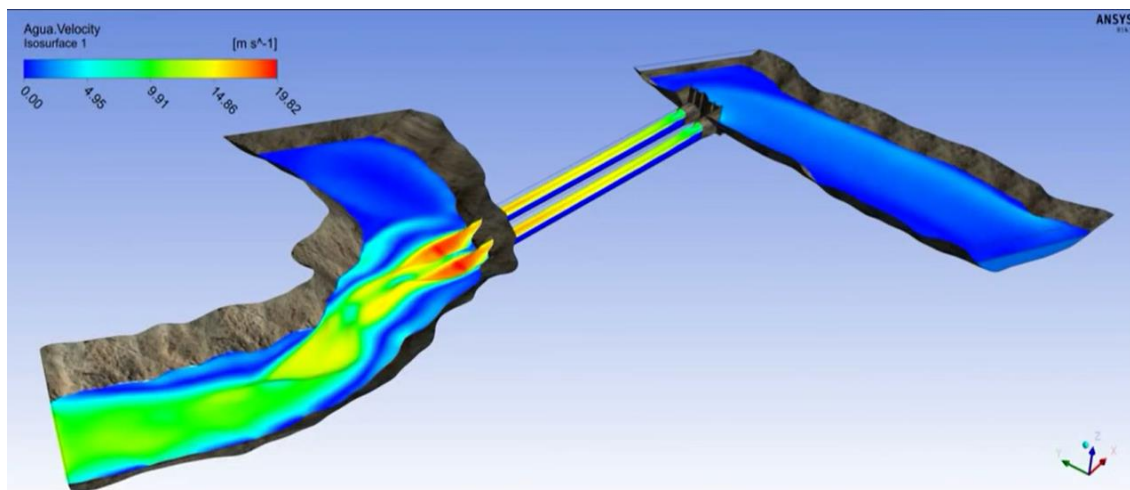


Figura 2.1- Exemplo de Simulação Numérica de Fluidos - CFD, recorrendo ao ANSYS [2].

1.2 Objetivos e Justificação

O objetivo da dissertação passa por estabelecer e validar um modelo numérico que permita simular o número e disposição de esporões ao longo de uma curva do canal meandriforme existente no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior, tendo por base os resultados de ensaios laboratoriais verificados no escoamento desenvolvido neste canal. Importa então perceber os fenómenos hidrodinâmicos desenvolvidos em escoamentos, assim como todas as leis que permitem a simulação de escoamentos no *software* Ansys FLUENT.

Relativamente a estudos de Engenharia Civil, a componente monetária detém elevada relevância nas decisões, sendo muitas vezes preponderante nas técnicas e metodologias adotadas desde a fase de projeto até à construção. A modelação numérica é atualmente uma temática em forte desenvolvimento e por isso é importante direcioná-la em todos os seus sentidos de aplicação. Uma vez que se trata de uma metodologia mais flexível e rápida e menos dispendiosa quando comparada com a modelação física, tornam-se fundamentais trabalhos de investigação neste ramo.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos, sendo este de carácter introdutório onde se pretende enquadrar o leitor no tema da dissertação, assim como esclarecer o objetivo e motivação deste estudo. Apresenta-se agora a organização dos restantes capítulos.

No segundo capítulo procede-se à revisão de conhecimentos relevante em dois domínios distintos, a simulação numérica de escoamentos de superfície livre e a influência de esporões no escoamento com intuito de proteção de margens. Assim, por um lado esclarece-se o funcionamento da modelação numérica de fluidos e por outro lado a aplicabilidade de esporões na proteção de margens. Neste capítulo apresenta-se o procedimento computacional associado à simulação de escoamentos, assim como os conceitos físicos inerentes ao comportamento dos escoamentos.

No capítulo 3, descreve-se o canal hidráulico meandriforme tido por base neste estudo assim como o procedimento adotado na modelação numérica do canal hidráulico, incluindo os resultados obtidos nas simulações intermédias que levaram ao ajustamento do modelo com base em resultados experimentais obtidos no laboratório para este mesmo canal. Apresentados os resultados finais procede-se à sua análise e discussão.

No capítulo 4 apresentam-se as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros que possibilitam o desenvolvimento e aperfeiçoamento desta investigação.

2.Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Neste capítulo procede-se à revisão de conhecimentos mais relevantes existentes na literatura. Definiram-se dois pontos fundamentais de estudo, sendo necessário compreender os conceitos e teorias no que concerne à simulação numérica aquando aplicada ao estudo de escoamentos de superfície livre com recurso à Dinâmica de Fluidos Computacionais - CFD e mais concretamente ao programa Fluent e por outro lado, perceber os fenómenos hidrodinâmicos ocorridos em escoamentos na presença de esporões para efeito de proteção de margens. Pretende-se assim neste capítulo esclarecer alguns dos pontos de partida para o desenvolvimento da dissertação.

2.2 Modelação Numérica de Fluidos

A Dinâmica de Fluidos Computacional (em inglês *Computational Fluid Dynamics* - CFD), também denominada por Modelação Numérica de Fluidos, é o ramo da mecânica dos fluidos responsáveis pela simulação numérica dos fenómenos que ocorrem num determinado escoamento. A utilização de CFD permite resolver problemas que envolvem escoamentos de fluidos através de métodos e algoritmos numéricos. Este ramo da mecânica de fluidos teve início em investigações no ramo de Aeronáutica na segunda metade do século XX [3]. A simulação numérica de casos cada vez mais complexos torna-se possível e acessível para um maior número de investigadores à medida que a capacidade de processamento dos computadores aumenta. Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), a resolução computacional de escoamentos por aplicação de CFD tem por base três momentos principais para caracterizar o problema e analisar os resultados [4]:

1. Pré-processador

O pré-processador pode ser interpretado como o domínio da simulação podendo ser bidimensional ou tridimensional, ou seja, mais não é que a definição do problema que se pretende estudar. Deve ser definida a geometria da região a simular, que é dividida num número finito de subdomínios normalmente denominados de volumes de controlo ou elementos finitos, criando-se uma malha. É nesta fase que se definem os dados de entrada do problema. Criado o domínio computacional, são definidos os fenómenos físicos que se pretende modelar, as propriedades do fluido assim como as condições de fronteira que limitam o domínio computacional. Desta forma, a especificação da geometria e a construção da malha que constitui o domínio de cálculo são as principais tarefas na fase de entrada [5].

2. Solver

O solver ou algoritmo numérico é o processo de resolução das equações de conservação que regem o escoamento. Nesta fase, cada equação é associada a todos os volumes de controlo formando-se sistemas de equações algébricas cujas incógnitas são obtidas por um processo iterativo, sendo que para uma solução convergente os resíduos que traduzem a conservação global das propriedades do escoamento são muito pequenos [5].

Na simulação de um escoamento, a aplicação de CFD passa por dividir esse escoamento num elevado número de elementos mais pequenos formando-se uma malha de volumes finitos. Posteriormente, a cada um dos elementos é aplicado um conjunto de equações resultantes de três princípios governativos da dinâmica de fluidos [3]:

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

3. Pós-processador

Após se obter os resultados do solver, o *software* permite fazer uma análise de resultados, com base em diversas propriedades do escoamento. Podem ser analisados resultados a nível de superfícies, fronteiras, planos ou linhas, sendo possível exportar dados de forma numérica ou proceder a uma interpretação mais visual como perfis, contorno, vetores e algumas animações com diversas propriedades dependendo do caso de estudo. Para que os resultados de simulação sejam viáveis há que salientar a importância da convergência e da malha [5].

2.3 Esporões

2.3.1 Enquadramento

Esporões são elementos de proteção de zonas costeiras ou margens de rios, sendo a sua principal função evitar ou controlar a erosão de margens impedindo o avanço do mar ou rios, mas podem ser utilizados a fim de garantir profundidade suficiente à navegabilidade em rios ou canais [6]. Estes podem-se considerar elementos transversais construídos a partir da margem até a um determinado limite que se mostre adequado à proteção desejada [7].

Em Portugal construíram-se os primeiros esporões em 1911, em Espinho. Trata-se de duas estruturas transversais à linha da costa distanciados de 90 m cujo objetivo foi evitar a erosão costeira que aí se sentia e que tinha provocado a destruição de grande número de edificações [8].

No entanto, a implementação de esporões provoca alteração do escoamento e leva a modificações no leito onde são inseridos, devido ao efeito que provocam sobre o campo de escoamento. É o controlo das alterações impostas ao escoamento que permite a protecção de margens, impedindo o avanço do leito na direcção da frente marginal. A geometria dos esporões pode ser mais simples ou complexa, podendo-se variar a secção, altura, largura, orientação e ângulo de mergulho. É o facto do esporão atuar sobre o campo de escoamento que obriga a um estudo específico para cada situação de escoamento. As soluções podem corresponder a um único esporão ou exigir a implementação de um campo de esporões, que levam a uma maior complexidade no controlo do escoamento, uma vez que este procura um novo equilíbrio para cada esporão implementado.

2.3.2 Soluções de esporões

Segundo Alfredini (2005) e Berni (2007) [9] um esporão isolado destina-se a desviar o escoamento afastando-o da margem, podendo não garantir a protecção da margem devido aos fenómenos provocados pelo escoamento que se verificam na sua envolvente, sendo habitual a implementação de campos de esporões neste género de intervenções. Caso não estejam bem dimensionados, os esporões podem causar erosão excessiva na zona da margem a jusante [1]. Esta erosão excessiva ocorre quando a recirculação e a zona turbilhonar formado na face de jusante do esporão se estende em demasia, atingindo a margem. Nestas situações o esporão atrai a corrente em vez de a afastar da margem [7].

Os campos de esporões são constituídos por um conjunto de esporões devidamente espaçados (Figura 2.2), sendo necessário definir um conjunto de critérios para o seu dimensionamento tais como o espaçamento entre eles, o comprimento, as cotas de coroamento, a sua permeabilidade transversal, o ângulo de orientação, o ângulo de mergulho e a sequência construtiva [8].

Os campos de esporões podem funcionar como esporões de repulsão ou de sedimentação. Os esporões de repulsão são construídos com o intuito de se formar entre eles uma zona de corrente estática que desvia o escoamento da margem, sendo por isso do tipo impermeável. Em determinadas situações, este tipo de solução pode representar uma solução mais cara que a protecção contínua da margem [7]. Outra forma de protecção de margens com recurso a esporões é a construção de esporões permeáveis ou de sedimentação, cuja principal função é permitir o depósito de sedimentos sólidos entre cada elemento através da diminuição da velocidade de escoamento nestas zonas. Para se evitar erosão junto aos esporões, estes devem ser de baixo comprimento, sendo que se podem amplificar à medida que a zona de sedimentação vai crescendo [7].



Figura 2.1- Campo de esporões [6].

2.3.3 Posicionamento em Planta

O posicionamento dos esporões depende da orientação, comprimento e espaçamento, sendo necessário estudar e conjugar estas variáveis por forma a se obter a solução mais assertiva. Os esporões podem então ser normais ao escoamento, orientado para montante ou orientados para jusante. O ângulo de orientação de um esporão é medido entre o eixo do esporão e o alinhamento a jusante dado pela tangente à margem no ponto de ancoragem. Assim um esporão direcionado para jusante é um esporão cujo ângulo de orientação é inferior a 90° , por sua vez, se este ângulo for superior a 90° significa que o esporão está orientado para montante.

No caso de esporões direcionados para montante, a corrente tende a desviar-se perpendicularmente ao esporão o que a leva em direção ao eixo do escoamento, originando uma zona de menor velocidade junto à margem criando-se uma zona de sedimentação entre estes esporões. O comprimento de proteção de cada um destes esporões é menor que em esporões normais ou direcionados para jusante, obrigando à construção de um maior número de elementos [7].

No que diz respeito a esporões direcionados para jusante, o escoamento tem tendência a provocar elevada erosão na extremidade destes devido à vorticidade, que normalmente acaba por atingir a margem ou o esporão a jusante deste, levando muitas vezes a maior instabilidade. De qualquer forma, a adoção destes esporões pode ser viável uma vez que causam menor turbulência no escoamento podendo diminuir a profundidade de erosão na sua extremidade e

reduzem a acumulação de sedimentos e entulho que em determinadas situações pode ser problemático [7].

Na proteção de margens com implementação de um campo de esporões, a linha fictícia que une os extremos dos esporões deve ser o mais regular possível, podendo ser uma condicionante ao comprimento de cada esporão. Na proteção de curvas os três primeiros esporões devem ter comprimento crescente para se evitar grandes variações no comportamento do escoamento junto da primeira estrutura [7].

Relativamente ao comprimento e espaçamento de esporões existem diferentes metodologias desenvolvidas e apresentadas por diferentes autores, sendo que todos eles defendem a existência de uma correlação entre estas duas características com a largura do escoamento. Apresenta-se na Tabela 1 um resumo destas correlações segundo cada autor, sendo L o comprimento do esporão, B a largura do canal na superfície do escoamento, h a altura de escoamento e S o espaçamento entre esporões.

Tabela 1- Correlação entre as geometrias do canal e esporões

Autores	Comprimento - L			Espaçamento - S			Localização
	min.		máx.	min.		máx.	
Brighetti e Martins, 2001 [7]	h	L	B/4	1×L	S	2×L	Regra geral
				4×L	S	6×L	Margem paralela
				2,5×L	S	4×L	Margem curva
Maza Alvarez, 1989 [10]	-	L	B/4	5,1×L	S	6,3×L	Linha reta
				2,5×L	S	4×L	Margem curva
CETMEF, 2009 [6]	S/1	L	S/6	1×B	S	2×B	Proteção de margem
				0,5×B	S	1×B	Canal navegável

Para se evitar um forte efeito de erosão sobre os esporões podem-se adotar diferentes geometrias para estas estruturas. Dentro de cada geometria os esporões podem ser mergulhantes, diminuindo-se o efeito de erosão na cabeça dos esporões.

2.3.4 Vorticidade Associada

A vorticidade está associada ao desvio das partículas de um escoamento, estando sempre presente no contacto do fluido com elementos rígidos. Sempre que a fronteira do escoamento permite o arrastamento de partículas, ocorre alteração no campo de escoamento iniciando-se a turbulência. Os esporões funcionam como um obstáculo ao escoamento e por isso a interação entre o escoamento e um esporão cria turbulência, originando-se vórtices em função do desvio a que o escoamento é imposto no escoamento ocorrendo a criação de vórtices. Num campo de esporões, a relação entre o comprimento e o espaçamento de esporões afeta o número de vórtices formados entre estes. No caso de campos de esporões normais ao escoamento,

Sukhodolov et al (2002) apresentam três padrões distintos na formação de vórtices. Ocorre a formação de dois vórtices de pequena dimensão e orientação transversal ao escoamento quando o espaçamento entre os esporões é inferior a metade do comprimento destes (Figura 2.2 a)). Nos casos em que o espaçamento entre esporões é superior ao dobro do seu comprimento, também se originam dois vórtices, sendo nestes casos paralelos ao escoamento (Figura 2.2 c)). Nas situações em que a relação entre o espaçamento e o comprimento está compreendida dentro deste intervalo é comum a formação de apenas um vórtice entre esporões (Figura 2.2 b)).

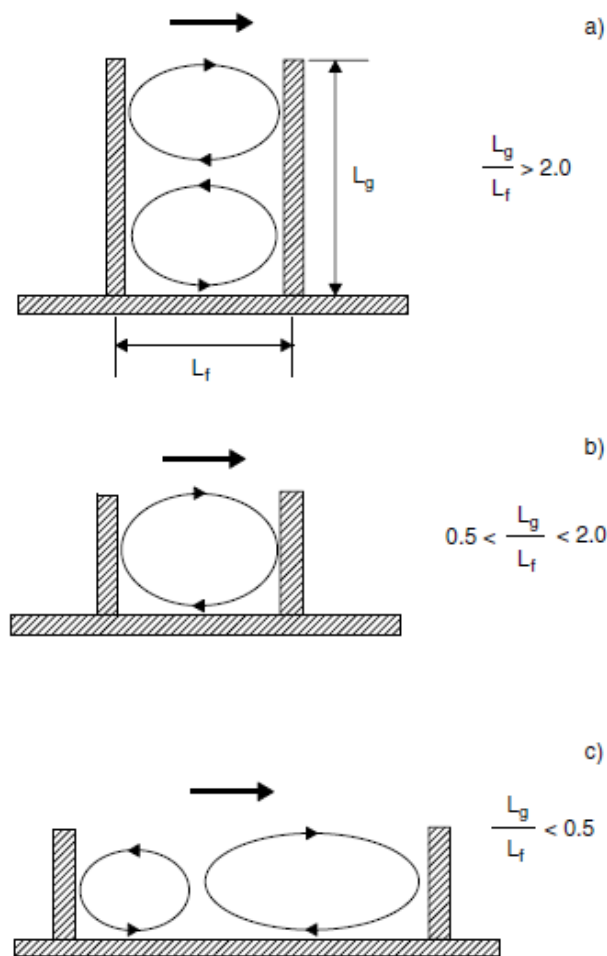


Figura 2.2- Dimensão e Espaçamento de Esporões vs Vórtices Formados [11], [12].

2.4 Lei Universal da Parede

Um escoamento turbulento é fortemente afetado pelo contorno sólido que se traduz no decréscimo da transferência de quantidade de movimento entre as camadas de fluido provocado pelas forças viscosas e diminuição das flutuações da velocidade normal na aproximação da parede. Esta diminuição de velocidade normal na proximidade das paredes deve-se à ação das forças de inércia. Já o decréscimo da transferência de quantidade de movimento entre as camadas de fluido provoca uma redução na escala de comprimento dos vórtices [13].

A análise destes fenómenos levou à formulação de uma hipótese por *Prandtl*, pois este verificou que o comprimento de mistura diminui à medida que a distância à parede também diminui e formulou a hipótese de proporcionalidade entre o comprimento de mistura e a distância à parede descrita na pela seguinte equação:

$$l_m = k \cdot y \quad 2.1$$

Onde l_m é o comprimento da mistura, y é a distância perpendicular à parede e k é a constante de Von Kármán tomando o valor de 0,4.

A formação de vórtices é influenciada pelo comprimento de mistura, podendo-se afirmar que a equação (2.1) também reflete o tamanho característico dos vórtices e por analogia sabe-se que estes têm um crescimento proporcional ao aumento da distância da parede, tendendo para uma dimensão característica do escoamento ou para um valor limite onde o efeito da parede deixa de ter influência sobre a turbulência local. Desta forma, em escoamentos turbulentos, na proximidade da parede a turbulência é inibida e pode mesmo ser suprimida.

Na Figura 2.3 representa-se a camada limite turbulenta de espessura δ para um escoamento sobre uma placa plana com velocidade U_∞ .

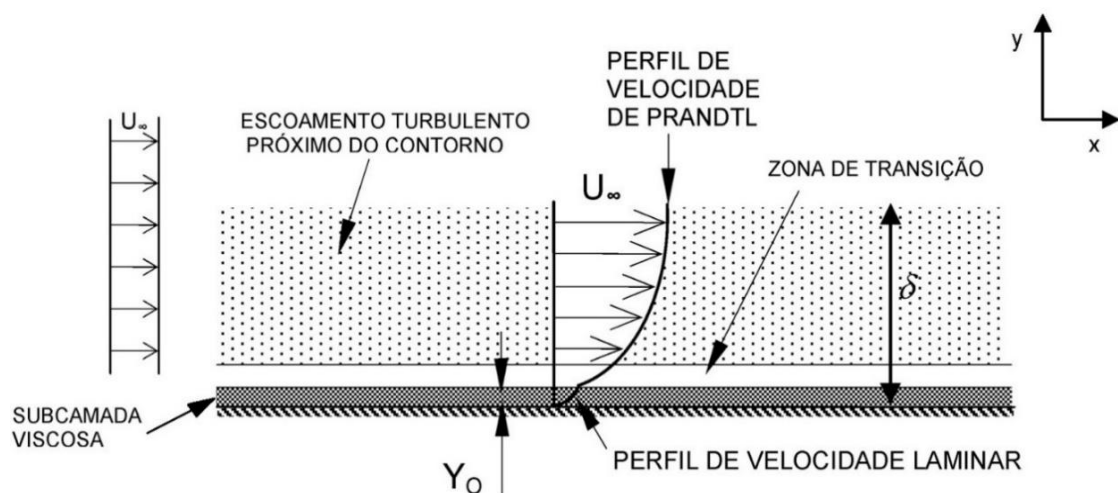


Figura 2.3- Subcamadas viscosa, turbulenta e zona de transição [13]

O efeito da parede no escoamento leva à formação de duas subcamadas no escoamento, nas quais prevalecem regimes de escoamento distintos. A camada mais próxima da parede denomina-se subcamada viscosa cujo escoamento se rege segundo efeitos de viscosidade, com o aumento da distância à parede o efeito desta sobre o escoamento tende a diminuir formando-se a subcamada turbulenta onde predominam os efeitos turbulentos. Uma vez que os perfis de velocidades dos dois regimes é diferente, alguns autores defendem a existência de uma camada intermédia relativa à zona de transição onde ocorre o ajustamento entre os regimes e assim o ajustamento dos perfis de velocidades[13].

2.4.1 Subcamada Viscosa

Junto à parede sólida considera-se que o fluido é estacionário por não existir nenhum deslizamento, assim e de acordo com a Lei da Viscosidade de Newton a tensão de corte (τ_w) junto à parede obtém-se pela equação:

$$\tau_w = \mu \frac{du}{dy} \quad 2.2$$

Sendo a viscosidade dinâmica do fluido (μ) obtida em função da sua massa volúmica (ρ) e da sua viscosidade cinemática (ν) de acordo com $\mu = \rho\nu$.

Nestes escoamentos, a subcamada viscosa corresponde a uma lamina de escoamento com espessura reduzida, pressupondo-se que a tensão de corte se mantém constante ao longo dessa espessura. Isto leva a que o perfil de velocidades (u) desta subcamada seja obtido por integração da equação (2.2), resultando:

$$u = \frac{\tau_w}{\rho\nu} y \quad 2.3$$

Uma vez que matematicamente esta equação resulta em velocidade nula junto à parede (para $y = 0$), esta camada é denominada por alguns autores de subcamada linear.

Importa relembrar que a velocidade de atrito (u_*) tem uma forte relevância no cálculo e análise da camada limite, sendo expressa por:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad 2.4$$

A divisão entre as equação (2.3) e (2.4) deu origem a parâmetros adimensionais para a velocidade e para a distância normal à parede:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{\sqrt{\tau_w/\rho}}{v} y \quad 2.5$$

Com,

$$\frac{u}{u_*} \equiv u^+ \quad e \quad \left(\frac{\sqrt{\tau_w/\rho}}{v}\right) y \equiv y^+$$

Onde u^+ e y^+ , representa, respetivamente, a velocidade adimensional e a distância adimensional, obtendo-se:

$$y^+ \equiv \left(\frac{\sqrt{\tau_w/\rho}}{v}\right) y = \frac{y \cdot u_*}{v} \quad 2.6$$

Segundo Kundu & Cohen (2002), a subcamada viscosa é muito fina, verificando-se entre a superfície sólida e $y^+ = 5$. Nesta zona, o perfil de velocidades apresenta um traçado quase linear, concluindo-se da equação (2.5) uma relação linear entre os parâmetros adimensionais ($u^+ = y^+$) nesta subcamada [13].

2.4.2 Subcamada Turbulenta

A subcamada turbulenta define-se, segundo Kundu & Cohen (2002), para valores de $y^+ > 30$, onde os efeitos de inércia dominam e por isso o escoamento é turbulento. Para esta região, a tensão de corte (τ_w) varia suavemente com a variação da distância à parede, o que leva a uma variação do perfil de velocidades obtido pela equação:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln y^+ + C \quad 2.7$$

Onde k (constante de *Von Karman*) assume o valor de 0,4 e C representa uma constante de integração cujo valor $C = 5$ é obtido experimentalmente [13]. Por substituição na equação (2.7) vem que:

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \left(\frac{y \cdot u_*}{v}\right) + 5 \quad 2.8$$

2.4.3 Perfil de Velocidades Junto de uma Superfície Sólida

O perfil de velocidades de escoamento junto ao contorno sólido obtém-se da junção dos respetivos perfis de velocidade das regiões viscosa e turbulenta, sendo obtidos respetivamente pelas equações (2.5) e (2.8) como se apresenta na Figura 2.4. Como referido anteriormente, existe uma região de transição entre a subcamada viscosa e a subcamada turbulenta, sendo limitada no intervalo $5 < y^+ < 30$. Esta subcamada é considerada como uma zona de ajuste entre ambos os perfis de velocidades estando sobre o efeito de viscosidade e turbulência em

simultâneo e por isso é considerada a zona de ajuste do perfil de velocidade como é visível na mesma figura.

A distância à parede é o parâmetro que permite representar de forma gráfica as diferentes subcamadas de escoamento formadas em escoamentos turbulentos sobre uma placa plana (Figura 2.4). Em análise a esta figura é prudente relembrar que y é a distância normal à parede enquanto que y^+ e u^+ são as equações que definem a distância e a velocidade adimensionais, representadas respetivamente pelas equações (2.5) e (2.6).

Em sumula, o escoamento junto a uma superfície sólida é caracterizado por leis (do tipo semi-empírico) que dependem da zona de escoamento e que foram apresentadas de forma simplificada mas com grau de precisão satisfatório como Lei Universal de Parede.

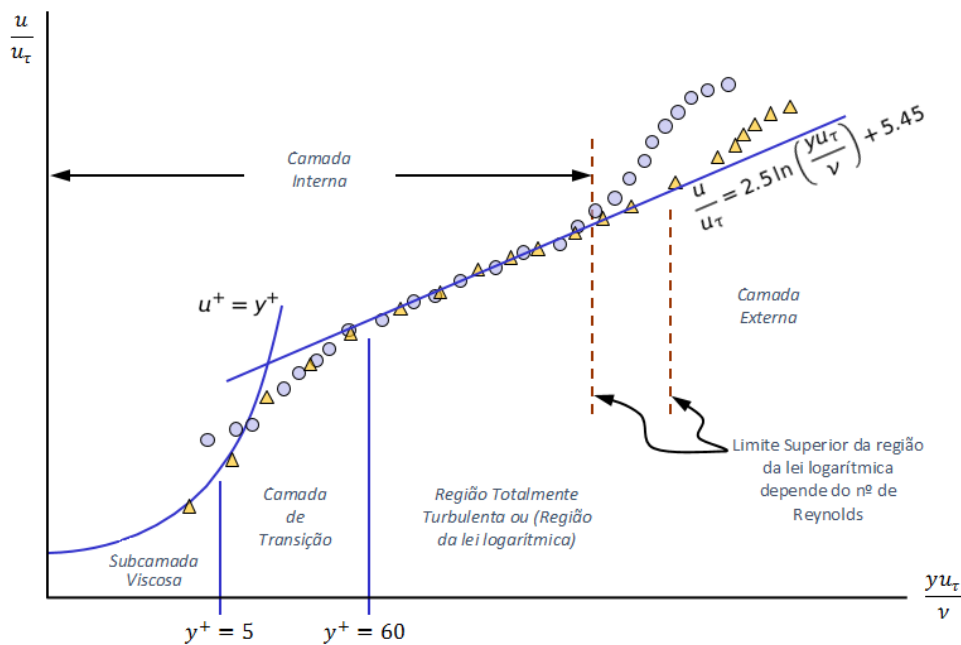


Figura 2.4- Perfil de velocidade junto a uma superfície sólida [14]

2.5 Equações de Navier-Stokes

O escoamento de um fluido é descrito matematicamente pela forma diferencial das equações de *Navier-Stokes*, cujas derivadas parciais permitem determinar os campos de velocidade e pressão apenas em escoamento simples, em regime laminar (número de *Reynolds* < 2500). Como referido anteriormente, para escoamentos em regime turbulento as soluções destas equações apenas é possível pela aplicação de CFD.

As equações de Navier-Stokes representam os princípios básicos da conservação da massa, da quantidade de movimento linear, da quantidade de movimento angular e da energia para um

fluido Newtoniano. Na aplicação destas equações a fluidos são necessárias algumas suposições. Considera-se que o fluido é um meio contínuo, ou seja, que o fluido não tem vazios e é necessário que todas as variáveis de interface (como pressão, velocidade, densidade e temperatura) sejam diferenciáveis, isto é, que não tem transição de fase.

2.5.1 Equações de Conservação da Massa

Num escoamento, a equação da conservação da massa é aplicada a um volume infinitesimal de fluido suficientemente pequeno para que seja válido o princípio da continuidade descrito pela seguinte equação:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad 2.9$$

Onde ρ é a massa volúmica do fluido, u_i a velocidade de escoamento, x a posição do volume ou partícula, i a direção e t o instante (tempo). No caso de fluidos incompressíveis, a massa volúmica não é função do tempo nem do espaço. Assim, para um sistema de coordenadas cartesianas obtém-se a simplificação:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 2.10$$

2.5.2 Equações de Quantidade de Movimento

A segunda lei de Newton, denominada de princípio fundamental da dinâmica, relaciona as forças externas aplicadas a um corpo com a sua massa e aceleração (2.11)

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad 2.11$$

Onde \vec{F} representa a força resultante aplicada a uma partícula, \vec{p} é a quantidade de movimento da partícula relativo a um sistema de referencia inercial, t o tempo, m a massa e \vec{v} a velocidade.

Na mecânica de fluidos, esta equação na forma diferencial é aplicada a um volume infinitesimal de fluidos. Por manipulação matemática, ao substituir-se o tensor das tensões viscosas pela relação constitutiva entre a tensão e a taxa de deformação para fluidos Newtonianos e isotrópicos, a equação de Navier-Stokes para um fluido de viscosidade μ tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x_j \partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad 2.12$$

Esta equação traduz o balanço entre o produto da massa pela aceleração correspondente e o conjunto das forças a que um volume infinitesimal se encontra sujeito, ou seja, a taxa de variação da quantidade de movimento pela resultante das forças gravíticas, de pressão e de atrito viscoso.

Para escoamentos tridimensionais, desenvolvendo a equação (2.12) obtêm-se três equações que caracterizam o escoamento em três direções ortogonais, abaixo representadas:

Em x ,

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad 2.13$$

Em y ,

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad 2.14$$

Em z ,

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad 2.15$$

Onde, ρg_i representa a força de massa por volume.

2.6 Modelos de Turbulência

Como referido anteriormente, para escoamentos turbulentos a solução numérica direta das equações de Navier-Stokes mostra-se extremamente complexa devido à existência de vórtices de diferentes escalas. Os vórtices em regime turbulento podem ser classificados como de macro escala se a sua dimensão for da ordem de grandeza da altura do escoamento ou de micro escala para dimensões de 10^{-3} dessa mesma altura. Por forma a ultrapassar as dificuldades impostas pela turbulência na resolução das equações governativas baseadas no método de simulação direta (Direct Numerical Simulation - DNS), foram desenvolvidos modelos de turbulência que se podem dividir em dois grandes grupos[3], LES - Large Eddy Simulation (Método da Simulação das Grandes Escalas da Turbulência) e RANS - *Reynolds* Averaged Navier-Stokes (Modelos baseados nas Equações Médias de *Reynolds*).

2.6.1 Large Eddy Simulation - LES

No método de Simulação de Grandes Escalas de Turbulência conhecido como LES, apenas os vórtices de grande escala são resolvidos enquanto que os efeitos dos vórtices de menor escala

são modelados e por isso o seu efeito é obtido por aproximação. Este método tem por base a condição fundamental de que os vórtices de grande escala dependem da sua geometria e por sua vez os vórtices de escala reduzida são considerados dissipativos e tendem em ter um comportamento universal[15]. A implementação desta condição na simulação, leva a que os modelos LES não necessitem de um esforço computacional tão elevado quanto os modelos DNS, mas por outro lado estes modelos necessitam do uso de outra lei semi-empírica, a da função de parede.

2.6.2 Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS

Nos modelos RANS, a resolução das equações de Navier-Stokes é obtida para o escoamento médio, permitindo simular mais escalas de turbulência em vez de se proceder à sua resolução numérica. Esta metodologia pode ser vista como uma simplificação das equações iniciais uma vez que para um escoamento médio são introduzidas novas incógnitas no sistema de equações sem se aumentar o número de equações, resolvendo-se aquilo a que se chama de “problema de fecho”, pois a solução destas incógnitas pode ser obtida através de um modelo de turbulência.

As novas incógnitas são conhecidas como tensão de *Reynolds* e permitem a simplificação das equações da conservação da massa (2.16) e da quantidade de movimento (2.17) como se apresenta:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad 2.16$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad 2.17$$

Os parâmetros do lado esquerdo da equação 2.17 representam a variação da quantidade de movimento média do fluido que depende de fatores como a variação de pressão, variação de tensões viscosas e da variação da tensão aparente $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ imposta pelo campo de velocidade flutuante.

Surgiram então várias abordagens que permitem obter o valor das tensões de *Reynolds*, dando origem aos modelos de fecho de turbulência, de onde se distinguem três grandes famílias de modelos[15]:

- Modelos lineares de viscosidade turbulenta;
- Modelos não-lineares de viscosidade turbulenta;
- Modelos de tensões de *Reynolds* (RSM) ou modelos de fecho de 2ª Ordem.

Os modelos lineares de viscosidade turbulenta são modelos em que as tensões de *Reynolds* são modeladas por uma relação constitutiva linear entre $\overline{u'_i u'_j}$ e tensores cinemáticos do escoamento médio, como o tensor identidade S_{ij} definido pela equação 2.18, dando origem ao conceito de viscosidade turbulenta.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad 2.18$$

Dentro do grupo de modelos lineares de viscosidade turbulenta, o coeficiente de viscosidade turbulenta pode ser obtido com base na resolução de diferente número de equações de transporte, existindo modelos algébricos, modelos de uma equação e modelos de duas equações.

De outra forma, os modelos não-lineares utilizam o coeficiente de viscosidade turbulenta para relacionar o campo de turbulência média com o campo de velocidade média com base numa relação não-linear.

Os modelos de tensões de *Reynolds*, conhecidos por RSM, são modelos em que as tensões de Reynolds são diretamente calculadas, não dependendo da abordagem de viscosidade e por isso são considerados modelos mais complexos.

De entre os modelos de turbulência RANS, atualmente os mais aplicados são os modelos de viscosidade de duas equações [3], apresentados de forma sintética neste subcapítulo. Para estes modelos são resolvidas as equações de transporte de quantidade de movimento e da energia cinética de turbulência acrescidas da resolução da equação da dissipação de energia cinética de turbulência ou da dissipação específica. Importa então referir que as tensões de Reynolds são obtidas pela equação 2.19 [15].

$$(-\rho \overline{u'_i u'_j}) = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad 2.19$$

Onde S_{ij} é o tensor de deformação obtido por (2.18), k representa a energia cinética da turbulência do escoamento, δ_{ij} é o delta de *Kronecker* e μ_t corresponde à viscosidade turbulenta cuja forma de se obter difere dependendo do modelo de turbulência.

De entre os modelos de turbulência disponíveis no *software* Fluent destacam-se quatro modelos de base para este trabalho:

- **Modelo $k-\varepsilon$ padrão**

O modelo $k-\varepsilon$ padrão, designado na literatura inglesa assim como pelos *softwares* de idioma inglês por *standard*, foi proposto por *Brian Launder* e *Dudley Spalding* em 1972. Trata-se de um

dos modelos de turbulência que utiliza duas equações de transporte adicionais, a de transporte para a energia cinética de turbulência (k) (2.22) e a da taxa de dissipação turbulenta (ε) (2.23) [16]. Segundo Azevedo (2011) [15], é necessário resolver as duas equações de transporte adicionais para se determinar a viscosidade turbulenta e assim obter as tensões de *Reynolds*. Segundo Ramos (2012) [16], este modelo apresenta maior dificuldade na caracterização de escoamentos onde se verifica a separação da camada limite do escoamento, em escoamentos com mudanças bruscas das taxas de estrangulamento, em fluidos rotativos ou em superfícies curvas, sendo válido apenas em escoamentos turbulentos.

- **Modelo k - ε RNG**

O modelo k - ε RNG ou renormalizado, foi desenvolvido com o intuito de melhorar as dificuldades identificadas no modelo original, tendo por base o método de renormalização que se trata de uma técnica estatística rigorosa. Esta abordagem resultou na modificação da equação da taxa de dissipação turbulenta (ε), permitindo abranger diferentes escalas de movimento. Desta forma, o modelo k - ε renormalizado trata-se de um modelo mais preciso e confiável para um grupo de escoamentos mais amplo [15].

- **Modelo k - ω padrão**

O modelo de turbulência k - ω padrão, também denominado por *standard*, pode ser considerado como uma atualização do modelo k - ε padrão, cuja última alteração foi proposta por *Saffman* e *Wilcox* em 1988. Nesta versão a viscosidade turbulenta passa a estar associada à energia cinética turbulenta (k) e à taxa de dissipação específica (ω) (2.24). As alterações impostas neste modelo permitem obter melhores resultados nas zonas de escoamento próximas das paredes e para escoamentos com baixos números de *Reynolds*, considerando-se por isso uma melhoria significativa do modelo inicial, sendo que apresenta limitações em zonas afastadas das paredes [16].

- **Modelo k - ω SST**

Este modelo foi apresentado como uma remodelação do modelo k - ω inicial, denominado de *Shear-Stress Transport* (SST). Trata-se de uma nova formulação proposta por *Menter* em 1994, onde se conjugara o modelo k - ω padrão com o modelo k - ε padrão. Nesta formulação, o escoamento é caracterizado pelos dois grupos de equações de transporte, um para as regiões mais próximas da parede e outro para as zonas mais afastadas. Esta conjugação permite prever com melhor precisão o início e o tamanho da zona de separação do escoamento. No entanto, para escoamentos com número de *Reynolds* muito baixo, deve-se adotar o modelo k - ω padrão [16].

2.7 Variáveis Características de Turbulência

A resolução das equações de Navier-Stokes de forma direta não é possível para escoamentos turbulentos, sendo necessário recorrer-se a equações de transporte adicionais que devem ser resolvidas utilizando modelos de turbulência. Estas equações de transporte levam à necessidade de se especificar condições de fronteira adicionais para as propriedades turbulentas na entrada e saída[15].

- **Intensidade da Turbulência**

A intensidade da turbulência (I) foi definida por Dryden e Kuethe em 1930 e representa a razão do desvio quadrático médio da flutuação da velocidade ($\sqrt{\bar{u}'^2}$) com a velocidade média de escoamento (U), obtida pela equação:

$$I = \frac{\sqrt{\bar{u}'^2}}{U} \quad 2.20$$

- **Comprimento Característico da Turbulência**

O comprimento característico da turbulência (l) caracteriza o comprimento dos grandes vórtices que contêm energia em escoamentos turbulentos, sendo que o seu comprimento deve ser menor que o domínio de escoamento e pode ser obtido por:

$$l = C_\mu \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad 2.21$$

Onde, C_μ é uma constante que toma o valor de 0,09 no modelo k - ε padrão, k é a energia cinética turbulenta e ε representa a taxa de dissipação turbulenta.

- **Energia Cinética Turbulenta**

A energia cinética turbulenta (k) obtém-se de uma relação entre a velocidade média do escoamento (U) com a intensidade da turbulência (I) abaixo apresentada:

$$k = \frac{2}{3} (U \times I)^2 \quad 2.22$$

- **Taxa de Dissipação Turbulenta**

Conhecendo o valor da energia cinética turbulenta (k) pode-se determinar o valor da taxa de dissipação turbulenta (ε) pela equação:

$$\varepsilon = C_\mu \frac{k^2}{v_T} \quad 2.23$$

Onde v_T é o valor da viscosidade turbulenta no modelo k - ε padrão.

- **Taxa de Dissipação Específica**

Conhecendo-se os valores da taxa de dissipação turbulenta (ε), da energia cinética turbulenta (k) e da constante empírica C_μ , pode-se determinar a taxa de dissipação específica (ω) pela expressão:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad 2.24$$

- **Viscosidade Cinética Turbulenta**

A viscosidade cinemática turbulenta (v_T) pode ser exprimida com base nas variáveis características da turbulência (energia cinética turbulenta - k e taxa de dissipação turbulenta - ε). Relacionando-se o valor da intensidade da turbulência (I) com a viscosidade cinemática (ν) e o número de *Reynolds* obtém-se o valor da viscosidade cinemática turbulenta na seguinte relação:

$$v_T = 0,22\nu I Re \quad 2.25$$

2.8 Método dos Volumes Finitos

No método dos volumes finitos - MVF, o domínio de solução é dividido num número finito de volumes ou células que contêm um nó localizado no seu centroide. A cada um dos volumes é aplicada a equação de conservação na sua forma integral por um processo computacional, obtendo-se os valores das variáveis para cada nó. Os valores das variáveis nas superfícies são obtidos por interpolação dos valores obtidos para os nós em redor. Assim, obtém-se uma equação algébrica para cada célula que contem os valores das variáveis do nó contido e dos nós envolventes [17].

Importa afirmar que este método assume que os integrais associados a duas superfícies coerentes são iguais, partindo-se do pressuposto que o conceito da continuidade é aplicável, ou seja, só deve ser aplicado se o material for uniforme. Esta simplificação, geralmente não levanta problemas em fluidos, mas pode levar a resultados inválidos para outros materiais devido às imperfeições intramoleculares.

Para se aplicar o MVF é necessário criar uma malha que defina as fronteiras do volume de controlo, que pode ser mais ou menos complexa dependendo da forma e geometria do elemento em estudo. Pode-se aplicar o MVF a qualquer tipo de malha, sendo por isso possível de se adaptar a geometrias complexas.

2.8.1 Malhas Numéricas

Na simulação numérica de escoamentos, a definição de um domínio de cálculo adequado é fundamenta para uma boa qualidade nos resultados. Assim a estrutura da malha ganha elevada relevância, devendo-se adotar aquela que melhor se ajuste ao domínio de cálculo. Uma malha numérica ou computacional não é mais que a representação do modelo físico através de um conjunto de linhas e pontos formados segundo determinados critérios. Existem diferentes tipos de malhas possíveis de adotar dependendo da geometria do problema, podendo ser classificadas de acordo com a sua ortogonalidade, forma ou estrutura (Figura 2.5).

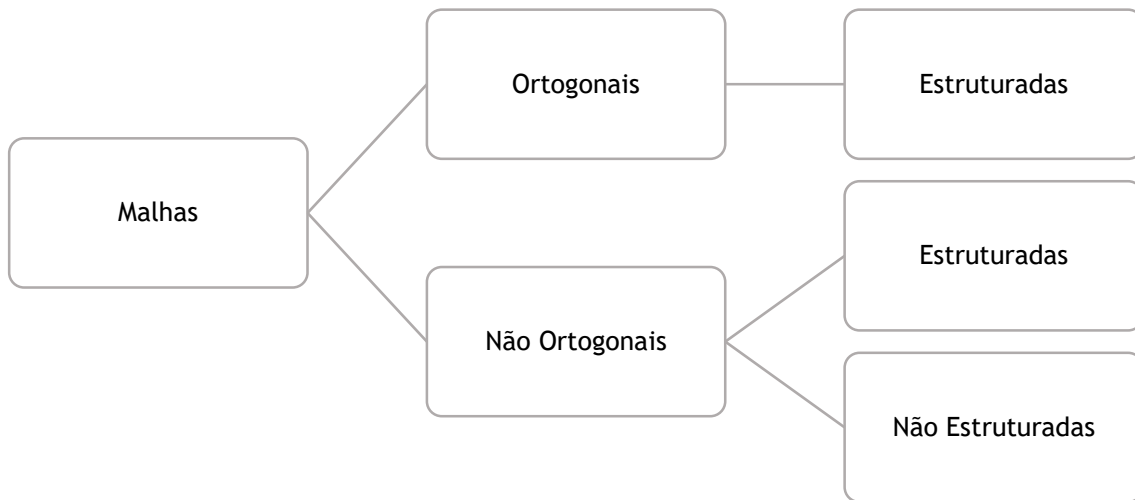


Figura 2.5- Tipos de Malhas [3], [16].

I. Ortogonalidade

As malhas podem então ser ortogonais ou não-ortogonais, dependendo do ângulo formado entre as linhas de uma rede, dizendo-se que uma malha é ortogonal se este ângulo for de 90° , caso contrário trata-se de uma malha não-ortogonal. Para uma malha ser ortogonal tem de se seguir uma geometria estruturado enquanto que, dentro do grupo de malhas não ortogonais podem-se ter malhas estruturadas ou não estruturadas. A aplicação de malhas estruturadas exige menos esforço computacional por se obter uma distribuição organizada dos volumes de controlo, mas estas malhas induzem a perdas de informação quando se trata de geometrias irregulares. Por isto, a utilização de malhas não ortogonais tem vindo a ser cada vez mais utilizada na caracterização de geometrias complexas.

De uma forma simples apresenta-se um exemplo exposto por Gonçalves (2007) [17] em que é perceptível uma maior precisão da malha não ortogonal relativamente a uma malha ortogonal, devido a uma melhor adaptação a superfícies irregulares por parte de malhas não ortogonais. Neste exemplo foi simulado um permutador de calor conforme a Figura 2.6, sendo apenas considerada para análise a zona sombreada por se tratar de um elemento simétrico.

Estudo da Influência do Espaçamento dos Esporões no Campo de Escoamento
Modelação Numérica

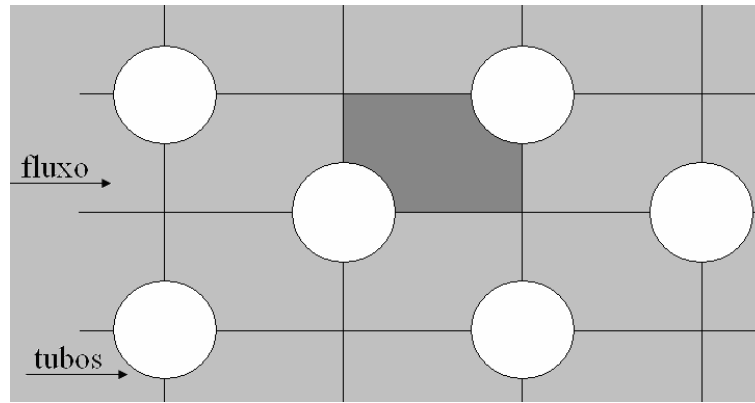


Figura 2.6- Permutador de calor - Adaptado [17]

No caso da utilização de uma malha ortogonal, verifica-se que 25% das células não são úteis pois definem a zona onde não passa fluido (Figura 2.7).

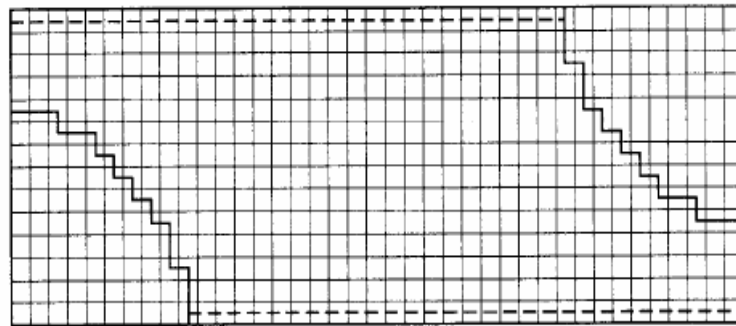


Figura 2.7- Malha ortogonal com 40x15 células - Adaptado [17]

Na Figura 2.8 está representada a mesma geometria mas agora caracterizado por uma malha não ortogonal com o mesmo número de células que o caso anterior, embora agora todas elas fazem parte do domínio de simulação, pois este género de malha adapta-se a geometrias irregulares.

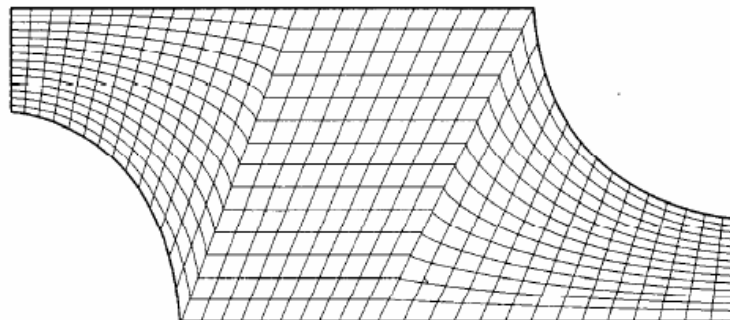


Figura 2.8- Malha não ortogonal com 40x15 células - Adaptado[17]

O campo de velocidade apresentado para a malha não ortogonal (Figura 2.10) apresenta-se mais detalhado quando comparado com os resultados obtido para a malha de elementos ortogonais (Figura 2.9), sendo possível uma melhor interpretação dos resultados no contorno da fronteira assim como na zona de secção de menor dimensão onde ocorrem maiores variações.

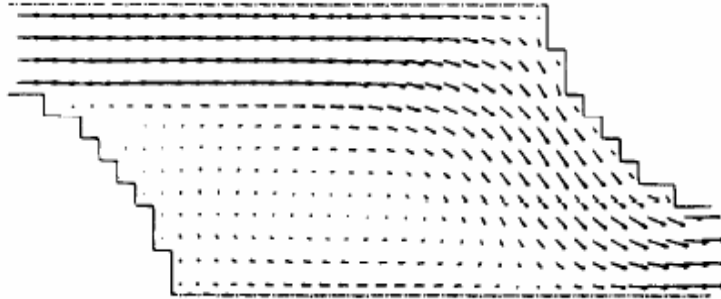


Figura 2.9- Campo de velocidades obtido com a malha ortogonal - Adaptado [17].

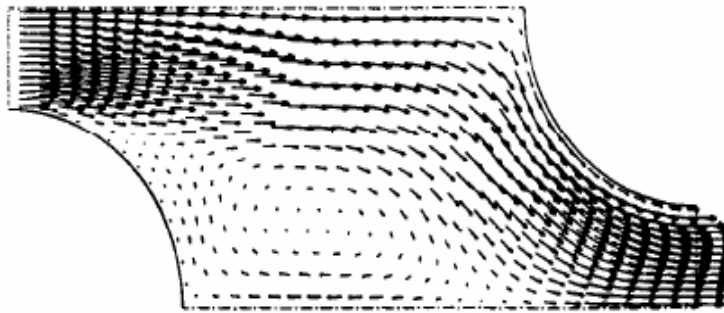


Figura 2.10- Campo de velocidades obtido com a malha não ortogonal - Adaptado [17].

II. Forma

Em modelos bidimensionais, as malhas podem ser de forma triangular ou quadrangular, sendo as primeiras mais facilmente adaptáveis a superfícies com geometrias complexas. No caso de domínios tridimensionais podem-se gerar diferentes formas, dependendo do método de construção da malha. Para casos de geometria mais simples, os volumes de controlo são representados por hexaedros que são formados pela repetição de malhas quadrangulares na direção perpendicular ao seu plano original. De modo análoga, para uma malha triangular formam-se volumes de controlo prismáticos. Em situações em que se encontram células tetraédricas com hexaedros os volumes de controlo ganham a forma de pirâmides.

III. Estrutura

Quanto à estrutura, as malhas podem ser estruturadas ou não estruturadas. Numa malha estruturada cada célula ou volume de controlo interno é circunscrito pelo mesmo número de

elementos, existido por isso uma sequência regular de construção. Esta característica traduz-se em dificuldades de ajuste em casos de geometrias complexas mesmo adotando-se malhas não ortogonais. Na geometria apresentada na Figura 2.11 a) é perceptível irregularidade na distribuição das células na malha. Se se pretender aumentar a precisão numa zona deste elemento é necessário aumentar o número de pontos nesse local, que leva ao acréscimo de células em toda a malha, mesmo em zonas onde seriam desnecessários. No método dos volumes finitos o aumento do número de células leva a um aumento de esforço computacional, havendo desperdício de recursos computacionais sempre que existem zonas com número excessivo de volumes de controlo. Nas geometrias mais complexas é então vantajoso a adoção de malhas não estruturadas, tal como se apresenta no exemplo da Figura 2.11 b). Estas malhas permitem uma melhor adaptação a qualquer tipo de geometria uma vez que não dependem de uma sequência regular de construção, podendo-se aumentar o número de células apenas nas zonas críticas. Estas vantagens levam a que as malhas não estruturadas se mostrem mais adequadas na resolução de problemas por aplicação do método dos volumes finitos, embora levem a um aumento na complexidade da metodologia de resolução numérica.

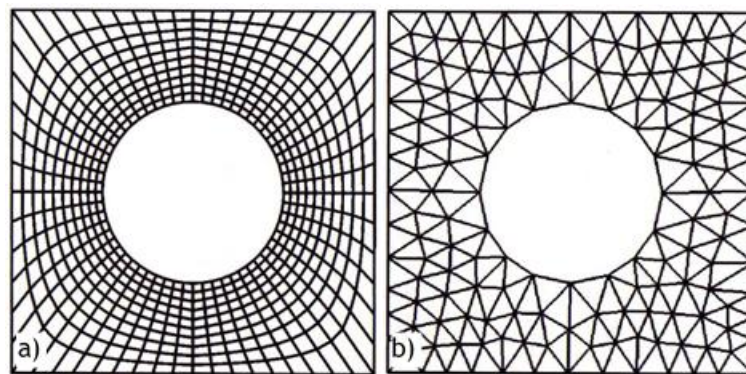


Figura 2.11- Malha estruturada vs. malha não estruturada [18].

3. Modelação Numérica do Canal Meandriforme

3.1 Introdução

No terceiro capítulo descreve-se o procedimento de modelação numérica adotado, começando-se pela descrição do canal e culminando na análise e discussão de resultados. Após o reconhecimento e caracterização do canal em estudo e respetivo escoamento, iniciou-se o processo de modelação, tendo-se validado o modelo numérico que reproduz de forma muito próxima o escoamento verificado em laboratório. Com base nesse modelo, estudou-se o efeito do campo de esporões no comportamento do escoamento.

3.2 Canal Meandriforme

O presente estudo incide sobre o canal hidráulico meandriforme existente no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior. Definiu-se como zona de estudo a segunda curva do canal, uma vez existir um trabalho desenvolvido por Vicario (2016) [19] relativo à caracterização do escoamento deste canal cujos principais resultados coincidem com esta mesma curva. Este canal representa um meandro composto por cinco curvas consecutivas que culmina num pequeno troço reto. Com o intuito de se obter um modelo com características próximas a um meandro real, a secção transversal deste canal é trapezoidal mas variável, ou seja, ao longo do seu trajeto a pendente das margens e o relevo do fundo são variáveis.

Na Figura 3.1 apresenta-se a planta do canal onde é visível a variação da largura da base e consecutivamente da pendente das margens ao longo do seu desenvolvimento. Encontram-se ainda identificadas as quatro secções em análise no presente estudo, sendo a secção de entrada do canal (S_o), a secção de montante da segunda curva (S_m), a secção central da segunda curva (S_c) e a secção de jusante da segunda curva (S_j).

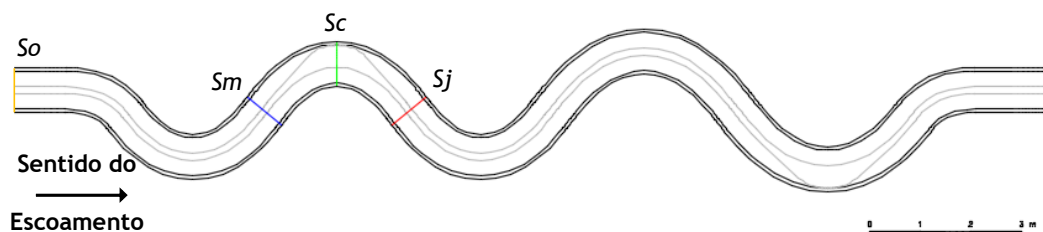


Figura 3.1- Canal Meandriforme - Planta.

Após a construção do canal foi colocada uma camada de areia com 15 cm de espessura, tendo-se como objetivo estabelecer a configuração do fundo em equilíbrio dinâmico (Figura 3.2).



Figura 3.2- Canal com fundo em equilíbrio (erodido) - Laboratório de Hidráulica - DECA

Nesta fase, a secção ao longo do canal era constante e simétrica com exceção da segunda e quinta curva. Nestas curvas, a pendente das margens varia de forma constante desde os 45° nos pontos de inflexão até aos 90° na margem exterior da secção central de cada uma destas curvas, levando a uma variação da largura na base, b , do canal. Na Figura 3.3 apresenta-se em corte a secção simétrica do canal (S_s), sendo visível esta simetria na pendente de ambas as margens que se traduz numa largura b de 43 cm no topo da camada de areia que forma o fundo inicial do canal.

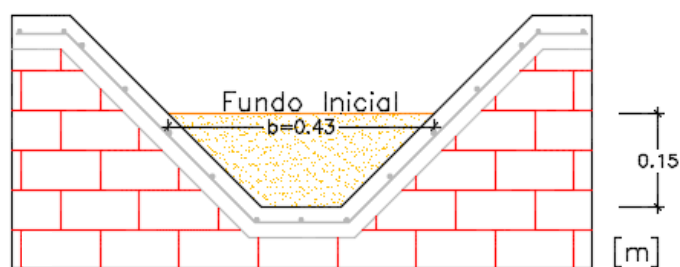


Figura 3.3- Secção simétrica (S_s), canal com fundo plano.

Estudo da Influência do Espaçamento dos Esporões no Campo de Escoamento Modelação Numérica

No corte da secção central da segunda curva (S_c), apresentado na Figura 3.4, é perceptível uma assimetria na pente das margens do canal, sendo a margem exterior vertical. Nesta secção, a largura b atinge o valor máximo de 59 cm.

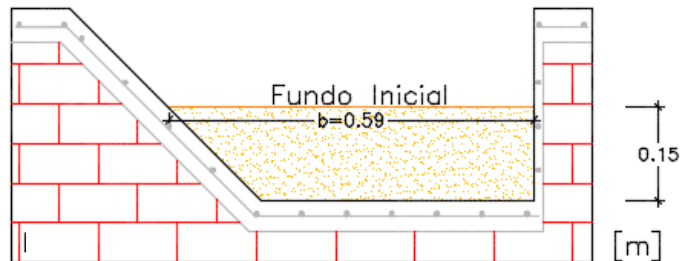


Figura 3.4- Secção central da segunda curva (S_c)

Para uma melhor caracterização do canal, apresentam-se os principais resultados obtidos por Vicario (2016) [19] e que são adotados no presente estudo, como método de comparação e validação de resultados numéricos. Segundo o autor, não foi possível alcançar o regime uniforme no escoamento devido à variação das condições hidráulicas nas secções estudadas. De forma a ultrapassar este problema, a autora optou por determinar uma altura média de escoamento e assim adotar uma secção equivalente, que lhe permitiu calcular os restantes parâmetros hidráulicos. Assim, a autora obteve o valor para o número de Reynolds (Re) de 25420, classificando o escoamento como turbulento não estacionário.

A secção de entrada do canal (S_o) é a secção na qual são conhecidos os dados de escoamento, pelo que se entende ser um dos principais pontos de análise para o presente estudo. Trata-se de uma secção trapezoidal com uma largura na base do escoamento (b) de 43cm, atingindo uma largura à superfície (B) de 67cm para uma altura de escoamento (h) de 12 cm imposta por um caudal (Q) de 20 l/s (Figura 3.5).

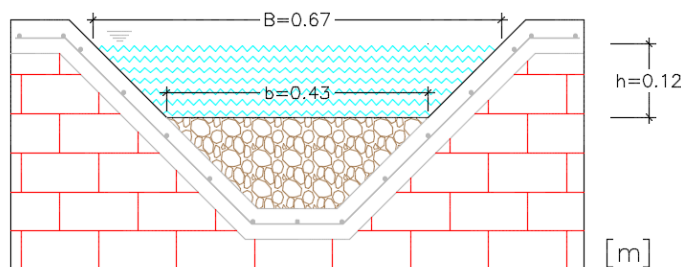


Figura 3.5- Secção de entrada do canal (S_o)

A entrada do caudal no canal dá-se pela passagem por um grupo de tubagens de pequeno diâmetro procedidos de uma rampa com 14° de inclinação, que em conjunto levam a uma

distribuição uniformizada do escoamento no momento em que este chega à secção de entrada [19] (Figura 3.6).



Figura 3.6- Estabilização do caudal na entrada do canal[19]

3.3 Metodologia Numérica

A nível computacional, utilizaram-se três *softwares* para além do Fluent. Quanto ao *software* de desenho foi utilizado o AutoCAD uma vez ser conhecido do utilizador e por isso dispensar de adaptação. Para criar malhas optou-se pela adaptação ao Pointwise uma vez ser um *software* que inclui o Fluent na sua base de dados. Para uma melhor qualidade na análise de dados obtidos nas simulações, recorreu-se ao Tecplot 360.

Para cada domínio de simulação definiu-se a geometria com recurso às capacidades de desenho em 3D do AutoCAD, sendo exportado um ficheiro igs que posteriormente é desenvolvido no Pointwise. O ficheiro igs pode ser interpretado como a base do modelo que se pretende definir, sendo os elementos que este contém denominado pelos fabricantes por *database*. Com recurso ao Pointwise cada *database* dá origem a um conector que vai delimitar uma malha, podendo ser ajustados os números de pontos associado a cada conector dependendo da exigência do caso em estudo. Cada malha gerada representa uma parte da fronteira da região de simulação. Após se definirem todas as malhas da envolvente da região de simulação é definido o volume de elementos finitos ao qual são atribuídas as condições de fronteiras relativas a cada malha. Gerada a malha e volume de controlo, é exportado um ficheiro cas compatível com o Fluent. No Fluent são definidas as características físicas do escoamento, propriedades do fluido e respetivas condições de fronteiras de acordo com o modelo de turbulência selecionado, sendo então resolvido o modelo numérico. Por fim são analisados os resultados obtidos, sendo necessário reiniciar todo o processo sempre que os resultados se afastam do que seria espectável. Este procedimento trata-se de um processo moroso não só por exigir uma grande capacidade computacional mas também por se tratar de um procedimento iterativo. Este

processo pode ser analisado de forma simplificada no fluxograma apresentado na Figura 3.7, existindo seis fases principais.

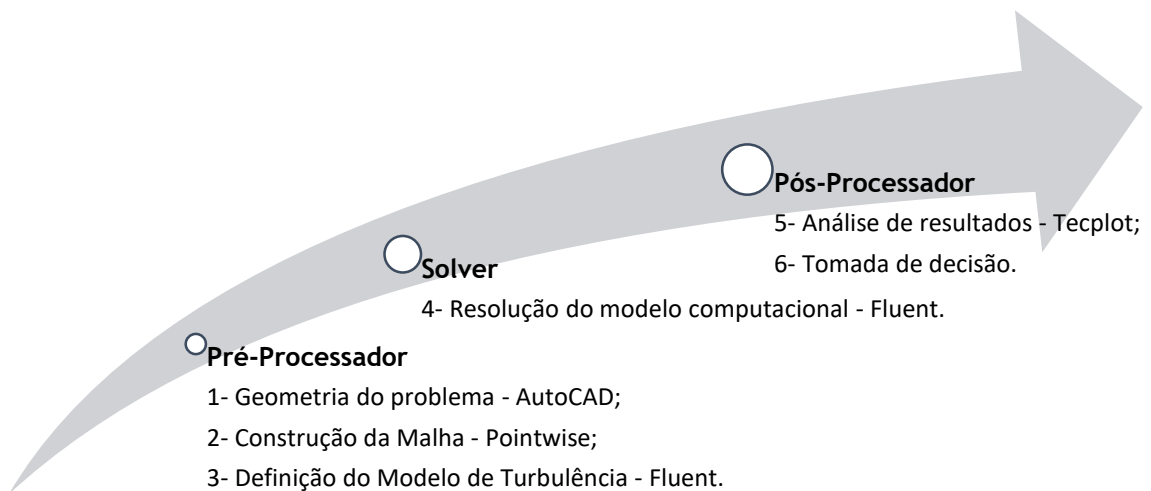


Figura 3.7- Metodologia experimental - Fluxograma

3.4 Simulações Experimentais - Casos Simplificados

3.4.1 Geometria do Problema

Começou-se por se desenvolver uma região de simulação apenas referente à segunda curva do canal hidráulico de secção trapezoidal variável e fundo plano. Numa fase seguinte, definiu-se como domínio de simulação a mesma curva do canal embora tendo por base a topografia do fundo já erodido (Figura 3.8).

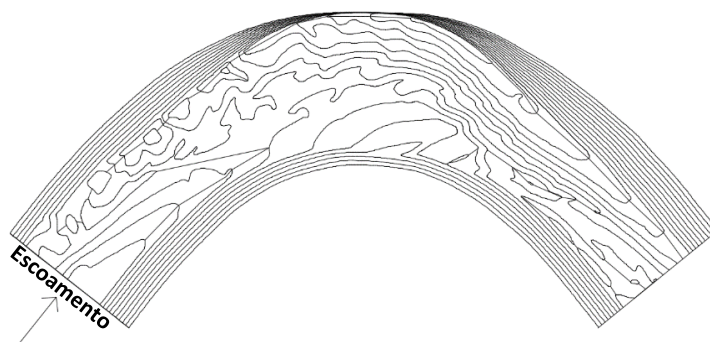


Figura 3.8- Segunda curva com fundo em equilíbrio - Planta.

Apesar da região em análise ser a curva apresentada, há que ter em atenção que o comportamento do escoamento nas secções de entrada e saída é afetado pelas condições de montante e jusante. A atribuição das características de escoamento verificadas na entrada do canal à secção de entrada da segunda curva pode levar a perdas de informação relevantes no que diz respeito ao desenvolvimento do escoamento, que na realidade é afetado pela primeira

curva. Por outro lado, os resultados no limite de jusante do domínio de simulação devem ser questionados uma vez que nessa zona o escoamento é afetado pela geometria a jusante. Optou-se por isto, por se construir um domínio de simulação mais complexo, tendo-se implementado um tramo reto com dois metros de desenvolvimento a montante e a jusante da curva, como se apresenta na Figura 3.9. Com a reta de montante pretende-se que o escoamento se desenvolva antes da entrada na curva. A reta de jusante, permite que o *software* atribua condições de escoamento após a secção de saída da curva, permitindo uma melhor precisão nos resultados na região curva.

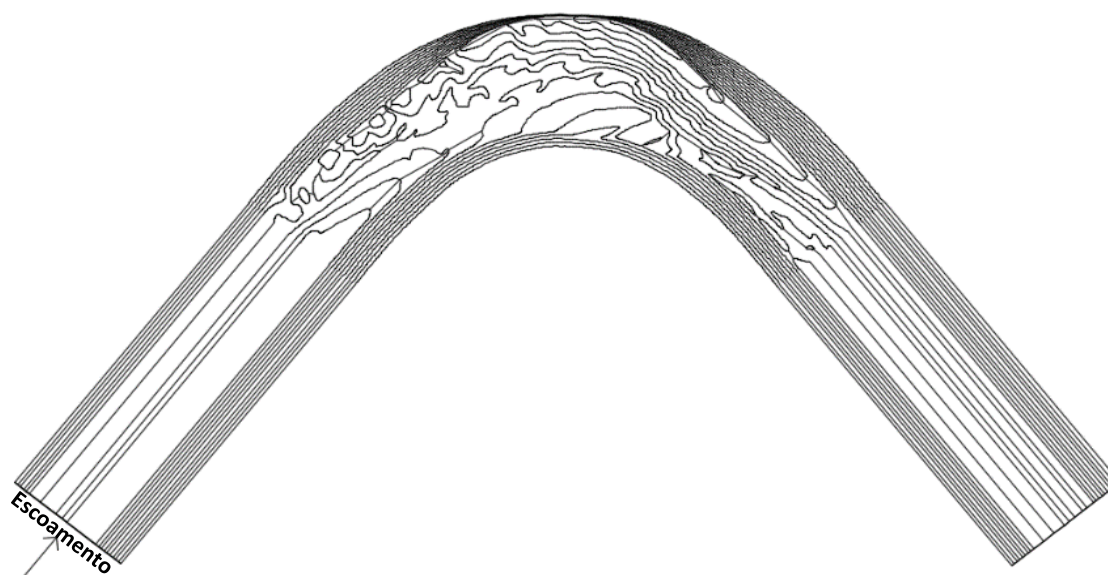


Figura 3.9- Modelo simplificado - Planta

3.4.2 Malha

- **Fundo Plano**

O primeiro problema diz respeito à geometria da segunda curva ainda com o fundo plano. Para este domínio de simulação foram desenvolvidas algumas malhas do tipo não estruturado uma vez serem as que permitem uma melhor adaptação a superfícies curvas. Experimentaram-se então duas metodologias distintas no que diz respeito ao refinamento da malha, pois se por um lado se pretende adotar malhas que não exijam demasiado esforço computacional, importa também ter em conta o tempo de construção e refinamento das mesmas.

Inicialmente construiu-se uma malha mais densa junto aos limites das fronteiras do canal e consecutivamente mais larga para o interior do escoamento. Esta metodologia permite escolher o número máximo de pontos atribuído a cada conector e o espaçamento mínimo entre pontos na sua extremidade. Numa análise tridimensional, uma vez que junto das paredes os fenómenos formados pelo escoamento exigem um elevado rigor de cálculo, seria necessário atribuir um

Estudo da Influência do Espaçamento dos Esporões no Campo de Escoamento Modelação Numérica

elevado número de pontos aos conectores longitudinais para que se atinjam bons resultados ao longo de todo o domínio tridimensional. Em pormenor na Figura 3.10 a), apresenta-se a malha na secção de entrada da segunda curva (S_m) onde é perceptível uma maior densidade de células junto aos vértices e laterais do escoamento, sendo que número de células diminui gradualmente para o interior do escoamento.

A outra formulação de refinamento da malha passa por criar malhas uniformes em todo o domínio, mas consecutivamente mais refinadas de caso para caso, tendo-se nesta fase experimentado malhas de 15 mm, 12 mm e 10 mm. Nestas malhas confirma-se a homogeneidade das células ao longo de toda a geometria da curva. Na Figura 3.10 expõe-se a sequência de refinamento da malha na secção de entrada da segunda curva (S_m).

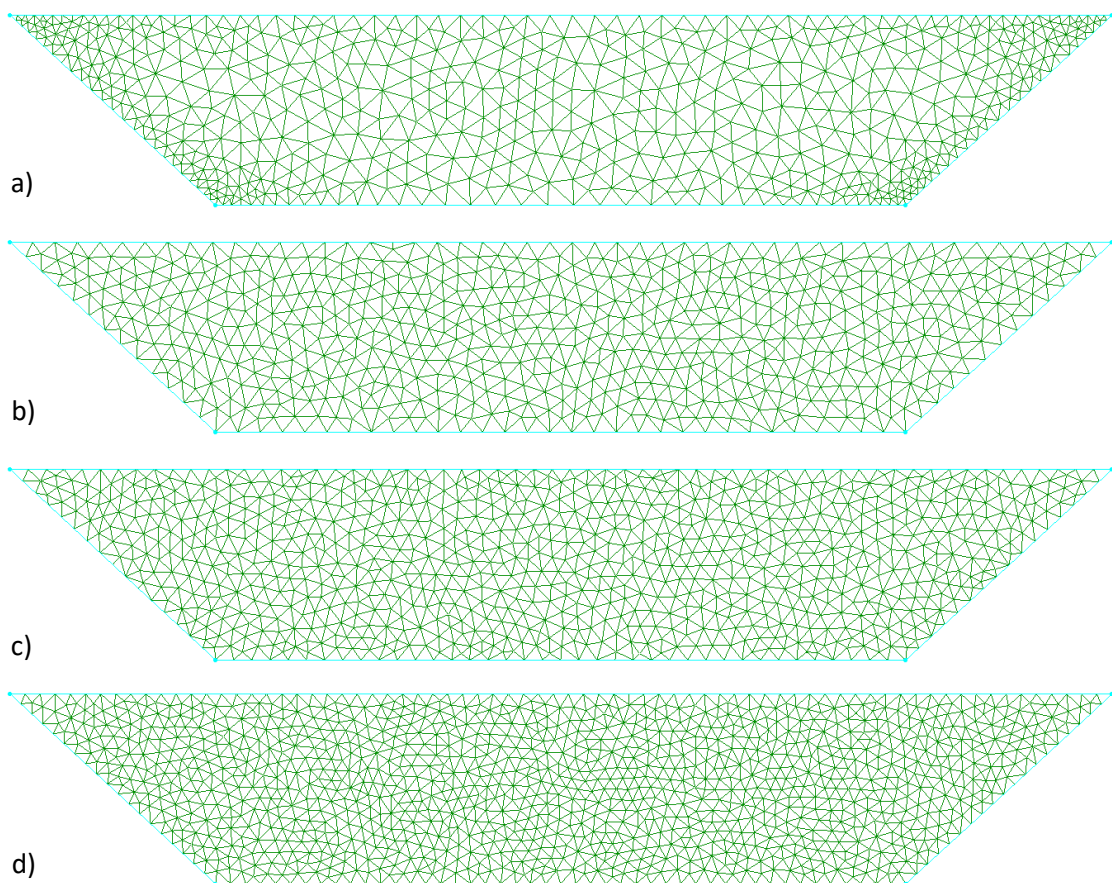


Figura 3.10- Malhas não estruturadas: a) não uniforme; b) uniforme de 15 mm; c) uniforme de 12 mm; d) uniforme de 10 mm. Secção de montante da curva 2 (S_m).

Quando comparado com malhas não uniformes, o processo de refinamento de malhas uniformes em geometrias complexas é mais rápido, ainda que seja importante encontrar a dimensão adequado a cada caso para que não se exagere no esforço computacional. Na Tabela 2 apresentam-se as características de cada um dos volumes de controlo obtidos a partir das quatro malhas acima apresentadas.

Tabela 2- Malhas experimentais, não estruturadas - Curva 2.

Tipo de Malha	Pontos	Células
Não Uniforme	38160	178146
Uniforme_15 mm	146146	759490
Uniforme_12 mm	256526	1357064
Uniforme_10 mm	402284	2154116

No que diz respeito ao volume de controlo obtido com a malha não uniforme, a zona central do escoamento é representada por um baixo número de células, sendo que o aumento de células nesta zona levaria a um elevado número de elementos nas zonas extremas, o que leva à inviabilidade destas malhas para este tipo de geometrias. Já o refinamento do volume de controlo com base em malhas uniformes leva a um aumento quase exponencial do número de células à medida que se reduz a sua dimensão.

- **Fundo em Equilíbrio**

Devido à complexidade do domínio do canal com fundo em equilíbrio optou-se por malhas não estruturas uniformes na caracterização das fronteiras do escoamento. De forma análoga aos volumes de controlo construídos para a geometria de fundo plano, mas considerando-se agora o modelo simplificado de fundo em equilíbrio, também se desenvolveram três volumes de controlo tendo por base malhas de 15 mm, 12 mm e 10 mm. Na Tabela 3 podem-se analisar as principais diferenças dos elementos dos três volumes de controlo.

Tabela 3- Malhas experimentais, não estruturadas - Modelo simplificado.

Tipo de Malha	Pontos	Células
Uniforme_15 mm	344060	1811396
Uniforme_12 mm	618356	3311435
Uniforme_10 mm	995426	5402058

Quando comparadas as dimensões dos volumes de controlo da curva não erodida (Tabela 2) com os obtidos nesta fase (Tabela 3), facilmente se conclui que as alterações implementadas na geometria do problema exigem um maior esforço computacional uma vez que o número de células a calcular mais que duplicou. Este aumento de elementos deve-se à introdução das zonas retas mas também à maior complexidade da geometria de fundo erodido.

3.4.3 Modelo de Turbulência

Perante todos os fundamentos teóricos apresentados no capítulo 2 do presente estudo e tendo em conta que estamos perante um escoamento turbulento, optou-se por desenvolver modelos numéricos com base no modelo de turbulência $k-\varepsilon$. Testaram-se então os três volumes de controlo apresentados na Tabela 3, para os quais se definiram as seguintes condições de fronteira:

Tabela 4- Condições de fronteira - Modelo simplificado.

Fronteira	Características
Entrada	<i>Inlet Water - Velocity Inlet</i>
	V(m/s) 0,29
	I 3,40%
	Dh(m) 0,350
Fundo	Wall - Parede
Superfície Livre	Wall - Parede
	Sem rugosidade
Saída	<i>Exit water - Outflow</i>

3.4.4 Análise de Resultados

Neste grupo de simulações, começou-se por adotar o valor de convergência predefinido pelo fabricante para cada modelo de turbulência, que segundo o manual do Fluent se demonstra suficiente na maioria dos modelos numéricos. Assim, considera-se que a simulação converge na primeira interpolação em que se atinja resíduos inferiores a 1×10^{-3} para os parâmetros da continuidade, das velocidade nas direções x, y e z, k e ε .

Nas Figuras 3.11 a 3.13, apresenta-se a distribuição de velocidades obtidas com base no modelo $k-\varepsilon$ para cada um dos três volumes de controlo. Verifica-se que na reta de montante ocorre uma diminuição da velocidade imposta pelo efeito da curva no escoamento, sendo que na fase inicial da reta este efeito deixa de se sentir. Na curva, verifica-se maior velocidade de escoamento no intradorso, atingindo-se velocidades superiores à velocidade de entrada. Desta forma, a opção de se considerar um troço reto a montante da curva demonstrou-se coerente, pois na secção de entrada o escoamento imposto tem velocidade uniformemente distribuída enquanto que à entrada da curva este facto não se verifica. Comparando-se os três gráficos, percebe-se que apesar dos limites de velocidade serem os mesmos, a malha de 10 mm (Figura 3.13) apresenta-se mais detalhada, o que se pode explicar pelo facto de esta possuir um maior número de elementos e assim permitir um melhor ajuste à geometria do fundo.

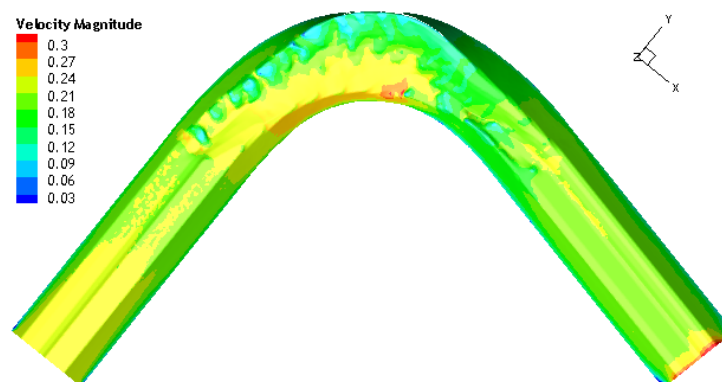


Figura 3.11- Magnitude da velocidade para volume de controlo de 15 mm.

Estudo da Influência do Espaçamento dos Esporões no Campo de Escoamento
Modelação Numérica.

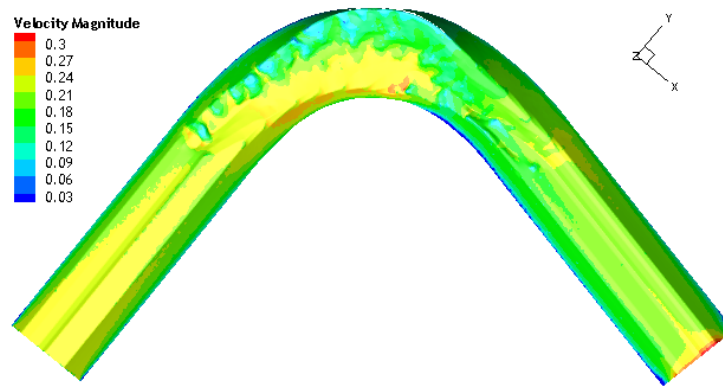


Figura 3.12- Magnitude da velocidade para volume de controlo de 12 mm.

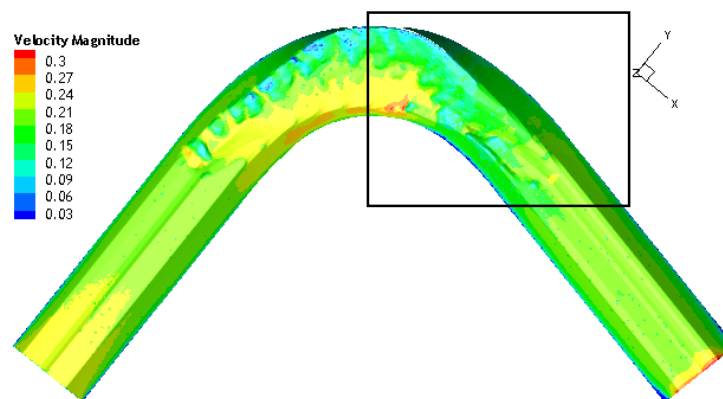


Figura 3.13- Magnitude da velocidade para volume de controlo de 10 mm - convergência 1×10^{-3} .

Embora a geometria do problema não represente integralmente o caso em estudo, seria espectável uma zona de velocidades mais baixas e a ocorrência de vorticidade junto à parede interior na segunda metade da curva. Para o volume de controlo de 15 mm (Figura 3.11) não é evidente a redução de velocidade nesta zona, sendo no entanto perceptível para as malhas mais densas (Figura 3.12 e Figura 3.13). Analisando as linhas de corrente para a malha de 10mm, não se verifica a referida formação de vórtices como se pode perceber na Figura 3.14.

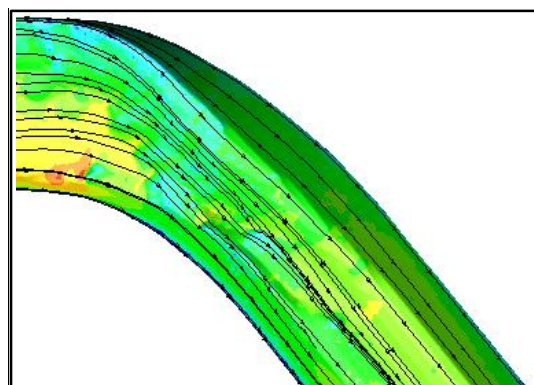


Figura 3.14- Promenor de linhas de corrente para o volume de controlo de 10 mm - convergência 1×10^{-3} .

Analisados estes resultados, optou-se por se aumentar o critério de convergência do modelo para 1×10^{-5} , uma vez que os resultados não corresponderam aos esperados. No novo campo de velocidades apresentado na Figura 3.15 verifica-se uma maior precisão de velocidades e em particular é evidente a diminuição de velocidade e alteração do escoamento após a secção central do escoamento. Em pormenor, na zona em destaque verifica-se um desvio do escoamento, originando-se os vórtices esperados.

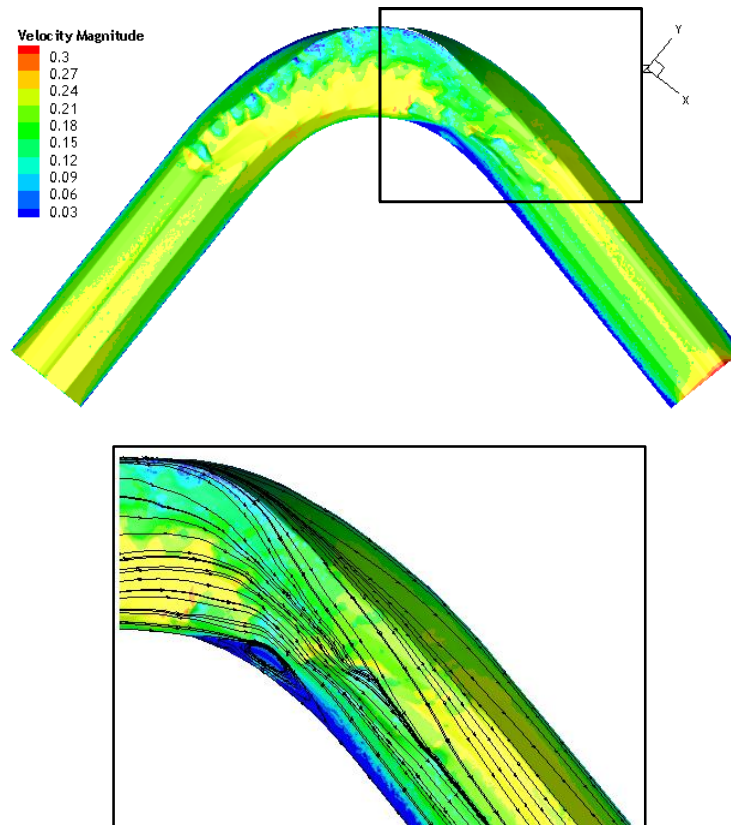


Figura 3.15- Magnitude da velocidade para volume de controlo de 10 mm; Pormenor de linhas de corrente - convergência 1×10^{-5} ;

Conclui-se nesta fase que para o modelo $k-\varepsilon$, a malha de 10 mm quando adotado o critério de convergência mais preciso representa o escoamento de forma mais realista. Contudo, as simplificações assumidas na geometria do problema são questionáveis, pois *à priori* não se sabe o grau de imprecisão imposto. Há ainda que perceber qual o limite aceitável no refinamento da malha e qual o modelo de turbulência que melhor representa este escoamento.

3.5 Validação do Modelo

O segundo grupo de simulações diz respeito à validação do modelo numérico que melhor representa as condições do escoamento. Pretende-se então desenvolver um modelo numérico cuja geometria e condições de escoamento representem o melhor possível a realidade do

escoamento, sendo de salientar que se considerou a topografia de fundo erodido como fixa. Definida a geometria do problema há que encontrar o equilíbrio entre o grau de refinamento da malha e respetivo esforço computacional exigido, tendo em conta os diferentes modelos de turbulência analisados ao longo deste trabalho.

3.5.1 Geometria do Problema

Nesta fase, o domínio de simulação representa toda a região em estudo que corresponde às duas primeiras curvas do canal hidráulico com o fundo em equilíbrio, tratando-se de uma geometria mas realista, embora muito mais complexa (Figura 3.16).



Figura 3.16- Geometria do problema - Validação do modelo computacional.

3.5.2 Malha

Com intuito de perceber a reação entre o refinamento da malha e o esforço computacional exigido pelo modelo, optou-se por se construir malhas não estruturadas, consecutivamente mais refinadas no intervalo de 20mm a 8mm, sendo espectável uma má aproximação dos valores obtidos pelos modelos de malhas menos densas. Apresenta-se na Tabela 5, as características dos cinco volumes de controlo.

Tabela 5- - Malhas não estruturadas - Validação do modelo.

Tipo de Malha	Pontos	Células
Uniforme_20 mm	184659	944645
Uniforme_15 mm	369295	1938494
Uniforme_12 mm	651447	3463447
Uniforme_10 mm	1093426	5923641
Uniforme_08 mm	1929609	10597724

3.5.3 Modelo de Turbulência

Pretende-se testar as duas vertentes de cada um dos modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$, de onde se pretende seleccionar o modelo que melhor represente o escoamento em análise. Para se evitar grandes períodos de espera, procurou-se adotar um procedimento que permitisse minimizar o número

de casos a simular. Para qualquer um dos modelos, atribuíram-se as mesmas condições de fronteira de acordo com a caracterização do canal apresentada neste capítulo e que se resumem na Tabela 6.

Tabela 6- Condições de fronteira - Validação do modelo

Fronteira	Características
Entrada	<i>Inlet Water - Velocity Inlet</i>
	V(m/s) 0,36
	l 3,40%
	Dh(m) 0,343
Fundo	Wall - Parede
Superfície Livre	Wall - Parede
	Sem rugosidade
Saída	<i>Exit water - Outflow</i>

3.5.4 Análise de Resultados

Para se perceber a viabilidade de cada um dos volumes de controlo construídos, optou-se por se simular cada um deles com base no modelo $k-\varepsilon$ RNG, adotando-se o critério de convergência predefinido, 1×10^{-3} . Para cada caso, registou-se o número de iterações e o tempo necessário para se atingir a convergência, obtendo-se o esforço computacional de acordo com a capacidade computacional disponível. Na Figura 3.17 apresenta-se o resultado de forma gráfica, sendo bastante evidente que o acréscimo de esforço evolui de forma não linear em relação ao refinamento da malha.

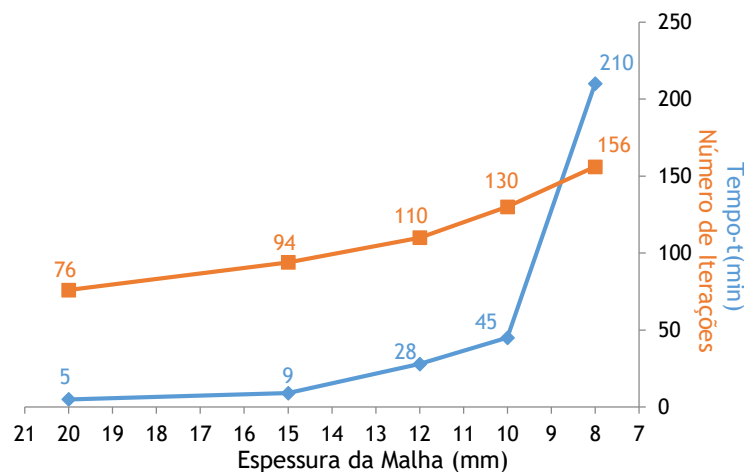


Figura 3.17- Esforço computacional

Em análise do gráfico da Figura 3.17, facilmente se interpreta que o volume de controlo obtido por malhas de 8 mm levou a um elevado acréscimo de esforço computacional quando comparado com os restantes quatro, sendo o tempo por iteração superior a um minuto. Uma vez que o tempo de simulação para o volume de controlo de 8 mm é quase cinco vezes superior

ao de 10 mm, procurou-se validar o modelo com malhas não inferiores a 10 mm. Assim, para uma melhor precisão nos resultados numéricos, implementou-se o limite de convergência de 1×10^{-5} , prolongando-se as simulações até se atingir a nova convergência para os volumes de controlo de 20 mm, 15 mm, 12 mm e 10 mm. Para cada volume de controlo traçou-se o perfil de velocidades segundo as três direções, sobre a secção central da curva numa linha vertical a 6 cm da parede exterior, correspondente ao perfil medido experimentalmente por Vicário (2016). Para uma melhor interpretação dos resultados, optou-se por adimensionalizar os valores das velocidades e das cotas, adotando-se a velocidade média de 0,25 m/s na secção central e a altura máxima de escoamento neste perfil de 0,228 m, ambas obtidas por Vicário (2016).

Na Figura 3.18 a), apresentam-se os valores de velocidade longitudinal obtidos para as quatro malhas testadas em sobreposição ao perfil experimental. Apesar de se verificar um pequeno desvio do perfil de velocidade longitudinal experimental, em relação aos valores numéricos, a malha de 10 mm é a que apresenta melhor aproximação. Na análise dos perfis de velocidades transversal apresentados na Figura 3.18 b), conclui-se que a diminuição da malha levou a uma aproximação do perfil experimental, sendo que se obteve uma melhor aproximação com a malha de 10 mm. No que diz respeito às velocidades verticais, o perfil obtido pela malha de 10 mm encontra-se inserido no perfil obtido experimentalmente por Vicario (2016) (Figura 3.18 c)).

Tendo em conta as observações apresentadas, a malha de 10 mm para o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG, permitiu uma melhor aproximação aos valores experimentais no perfil em análise. De salientar que os desvios verificados entre os valores experimentais e os valores obtidos numericamente podem representar uma acumulação de erros, como medições experimentais, simplificações da geometria do problema ou má aproximações do modelo de turbulência testado.

Adotando-se a malha de 10 mm optou-se por se simular a mesma geometria do problema para os modelos $k-\varepsilon$ padrão, $k-\omega$ padrão e $k-\omega$ SST, apresentando-se os resultados obtidos para o mesmo perfil de velocidades na Figura 3.19. De forma análoga, procedeu-se à comparação dos resultados obtidos para os quatro modelos com os valores experimentais. Desta análise verifica-se que ambas as vertentes do modelo $k-\omega$, quando comparados com os modelos $k-\varepsilon$, apresentam melhor aproximação aos perfis de velocidades segundo as três direções de escoamento, não se revelando diferenças significativas na direção longitudinal e vertical. Quanto ao perfil de velocidades transversais, a vertente padrão do modelo $k-\omega$ apresenta valores ligeiramente superiores, enquanto que, a vertente $k-\omega$ SST apresenta valores um pouco inferiores aos experimentais. Destes resultados, pode-se então concluir que ambos os modelos de turbulência ($k-\omega$ padrão e $k-\omega$ SST) apresentam boa aproximação, optando-se por se analisar mais pormenorizadamente o modelo padrão, uma vez que a sua exigência computacional é bastante inferior.

Estudo da Influência do Espaçamento dos Esporões no Campo de Escoamento
Modelação Numérica

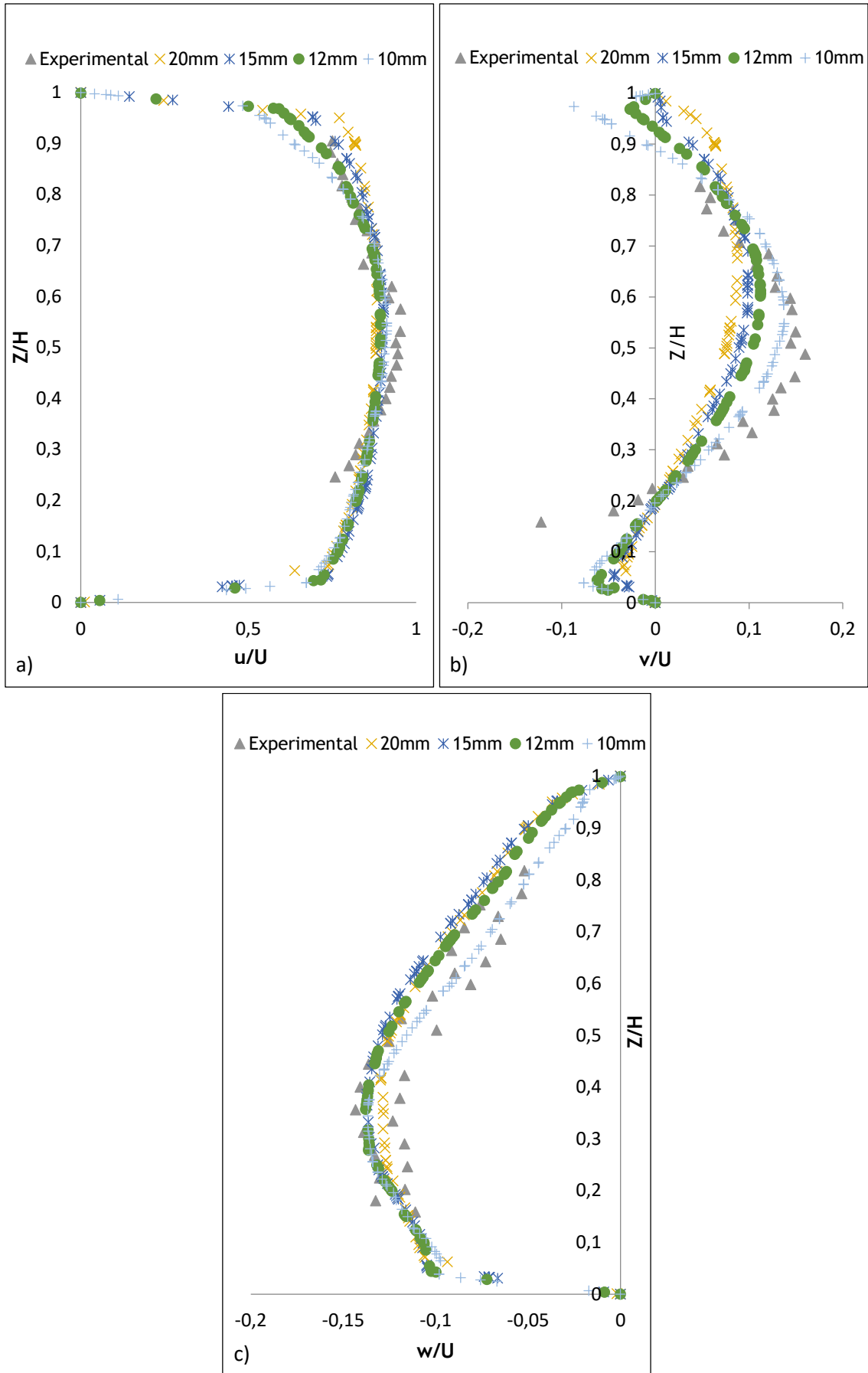


Figura 3.18- Validação da malha - Perfil de velocidade: a) Longitudinal; b) Transversal; c) Vertical

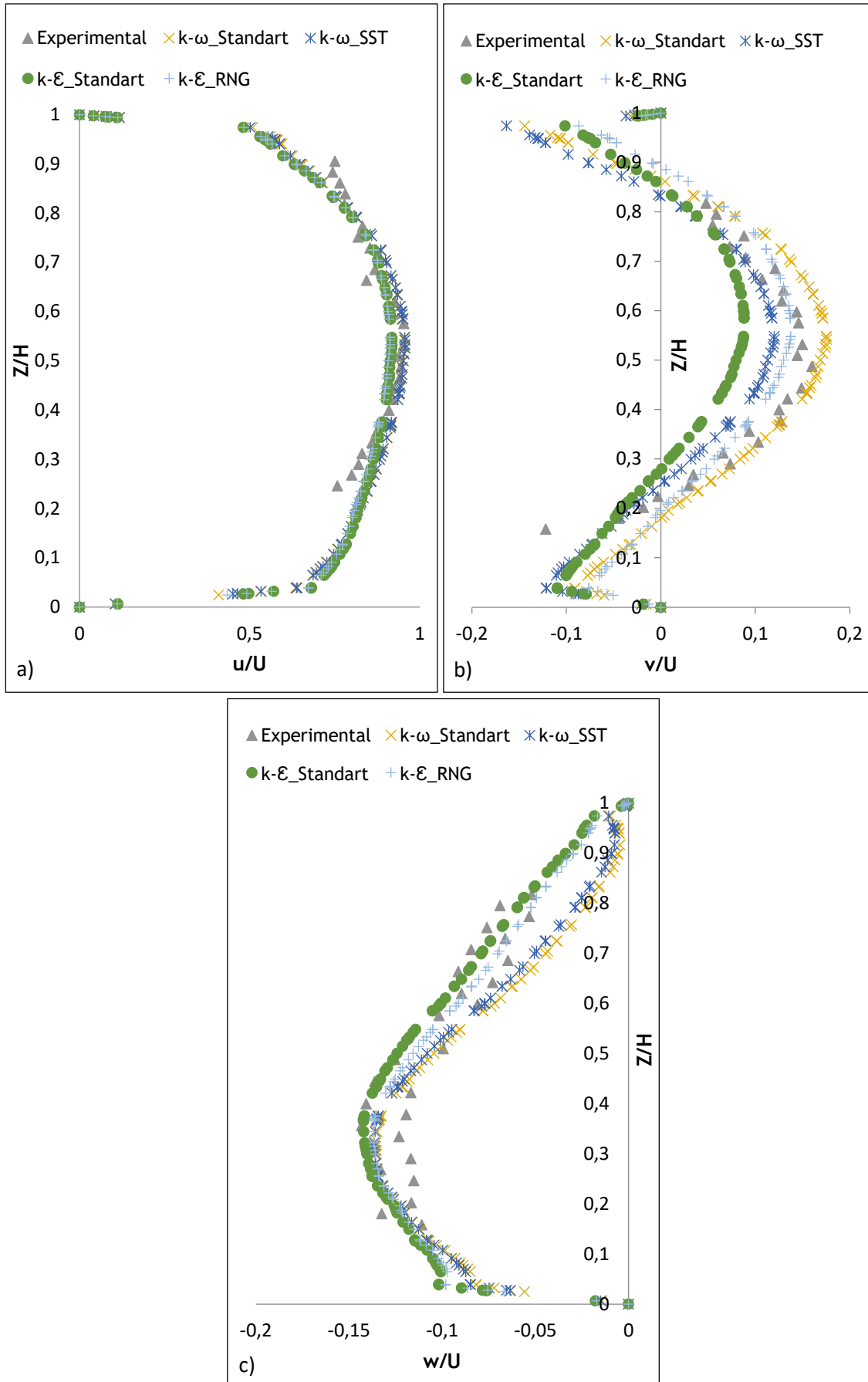


Figura 3.19- Validação do modelo - Perfil de velocidade: a) Longitudinal; b) Transversal; c) Vertical

Tendo em atenção que o modelo de turbulência $k-\omega$ padrão permite boa aproximação de resultados junto de superfícies, mas pode levar a resultados de pior aproximação nas zonas do interior do escoamento, teve-se a necessidade de justificar a boa adaptação deste modelo em zonas distantes da parede. Apresenta-se na Figura 3.20 as linhas de corrente da secção central, geradas pelo modelo $k-\omega$ padrão (a), em comparação às linhas obtidas experimentalmente por Vicario (2016) (b). Apesar das linhas de corrente desenhadas por Vicario (2016) não representarem toda a secção transversal, a zona estudada apresenta-se com elevado grau de aproximação.

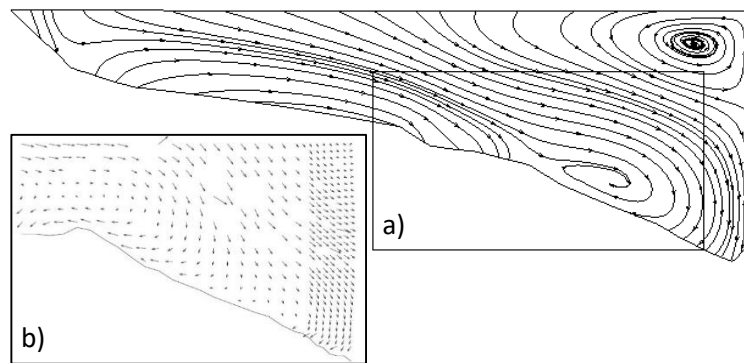


Figura 3.20- Linhas de corrente, secção central: a) Modelação; b) experimental [19].

Na Figura 3.21 apresentam-se as linhas de corrente expostas por Knighton (1998) nas secções de inflexão e centro de curvas em meandros. De modo a garantir a validação do modelo numérico desenvolvido neste capítulo, analisam-se agora as linhas de corrente obtidas numericamente para as secções de entrada (S_m), central (S_c) e de saída (S_j) da curva em estudo, que correspondem às secções teóricas equivalentes representadas da Figura 3.21.

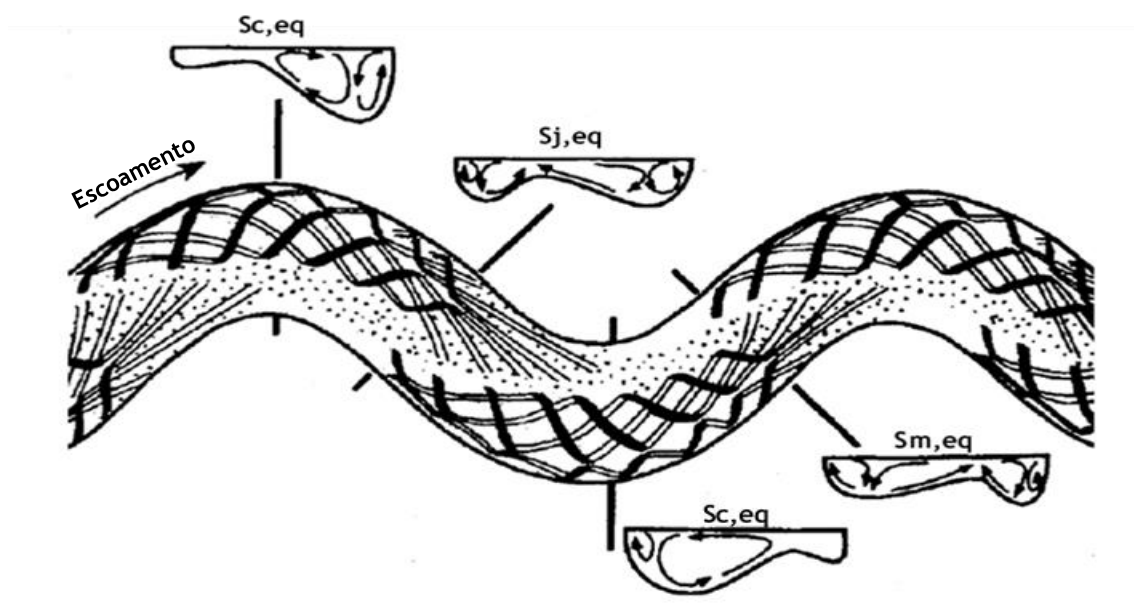


Figura 3.21- Linhas de corrente teóricas nas secções de inflexão e central de um meandro - Adaptado de Knighton (1998). [19]

Em relação à secção central (S_c), pode-se verifica-se que os vórtices longitudinais apresentados na Figura 3.20 a) têm uma disposição idêntica aos propostos por Knighton (1998) de acordo com a secção $S_{c,eq}$ da Figura 3.21.

Na Figura 3.22 a) apresentam-se as linhas de corrente representativas dos vórtices longitudinais obtidos pelo modelo numérico na secção de entrada da curva (S_m), comprovando-se uma boa correspondência da disposição destes vórtices em relação à disposição proposta na secção $S_{m,eq}$. Quando comparada a secção de saída da curva (S_j) na Figura 3.22 b) com a secção $S_{j,eq}$ da Figura 3.21 verifica-se uma boa correlação das linhas de corrente, embora no caso de estudo o vórtice principal se apresente mais bem definido que no modelo proposto por Knighton (1998).

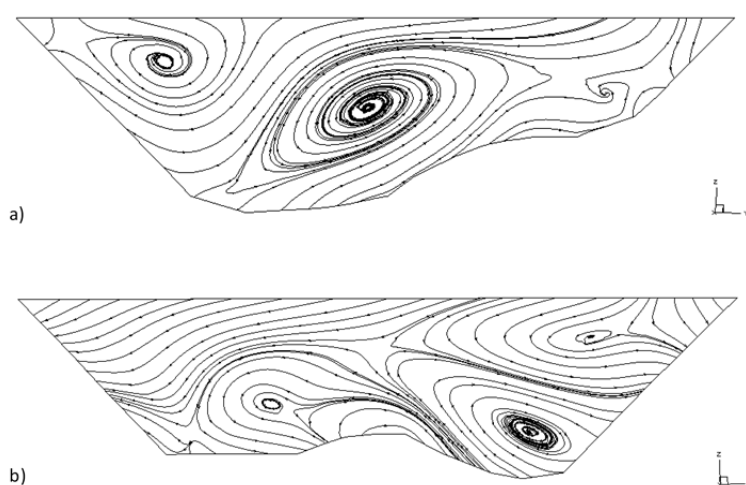


Figura 3.22- Linhas de corrente: a) Secção de entrada da curva (S_m); b) Secção de saída na curva (S_j).

Tendo em conto toda a análise dos resultados apresentada nesta secção, considerou-se que o modelo computacional desenvolvido com base em malhas de 10 mm e resolvido pelo modelo de turbulência $k-\omega$ padrão, representa com elevado grau de ajustamento ao escoamento real do canal em estudo e por isso considera-se este modelo válido.

3.6 Caso de Estudo - Esporões

3.6.1 Pré-dimensionamento do Campo de Esporões

Definiu-se como objetivo de estudo a simulação numérica e análise da influência do número de esporões no comportamento do escoamento verificado na segunda curva do canal meandriforme em estudo. Conhecido o problema em análise, deu-se início ao pré-dimensionamento do campo de esporões.

Estudo da Influência do Espaçamento dos Esporões no Campo de Escoamento Modelação Numérica

Neste estudo, optou-se por se desprezar o efeito da geometria do esporão, tendo-se adotado esporões retangulares de 2 cm de espessura. Na localização do primeiro esporão seguiu-se a recomendação para proteção de margens exteriores em curvas proposta pelo corpo de engenheiros dos Estados Unidos (USACE), apresenta-se na Figura 3.23 um esquema ilustrativo da metodologia, sendo B a largura do canal na superfície de escoamento e ilustrado a cinzento a região que deve ser protegida.

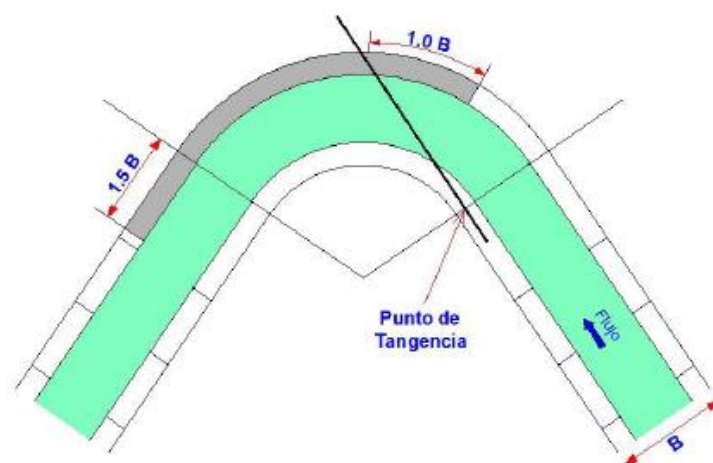


Figura 3.23- Recomendação para proteção de margens exteriores em curvas (USACE) [20]

No que diz respeito ao comprimento do esporão adotou-se o valor de 15 cm uma vez estar de acordo com os critérios defendidos por vários autores conforme se apresenta na Tabela 1 e Tabela 7. Nas mesmas tabelas inclui-se também os parâmetros defendidos por estes autores no que diz respeito ao espaçamento entre esporões, tendo-se adotado o valor de 50 cm. A determinação destes três parâmetros equivale ao pré-dimensionamento do campo de esporões, sendo necessário proceder aos ajustes do ângulo de orientação e ângulo de mergulho dos esporões. Podem também ajustar-se os valores do comprimento e espaçamento do esporão desde que devidamente justificado.

Tabela 7- Valores para comprimento (L) e espaçamento entre esporões (S).

Autores	Comprimento - L (cm)			Espaçamento - S (cm)			Localização
	min.	L	máx.	min.	S	máx.	
Brighetti e Martins, 2001 [7]	12,0	15,0	17,5	15	23	30	Regra geral
				60	75	90	Margem paralela
				37,5	49	60	Margem curva
Maza Alvarez, 1989 [10]	-	18,0	17,5	91,8	103	113,4	Margem reta
				45	59	72	Margem curva
CETMEF, 2009 [6]	11,7	18,0	23,3	70	105	140	Proteção de margem
				35		70	Canal navegável

3.6.2 Análise e Discussão de Resultados

A implementação de um campo de esporões na curva em estudo tem como objetivo a defesa da margem exterior onde o escoamento provoca maior erosão, não descurando o efeito provocado pelo redireccionamento do escoamento na margem interior. Desta forma, começou por se analisar os diferentes efeitos causados entre um esporão normal não mergulhante, um esporão normal com ângulo de mergulho de 15° e um esporão orientado 120° para montante com ângulo de mergulho de 15° . A metodologia adotada permitiu comparar as alterações introduzidas por cada esporão no que diz respeito às velocidades e tensões de corte verificadas ao longo da curva. Nas Figuras 3.24 a 3.27 apresenta-se a sequência dos resultados numéricos obtidos, para a curva sem esporão e para os três casos analisados.

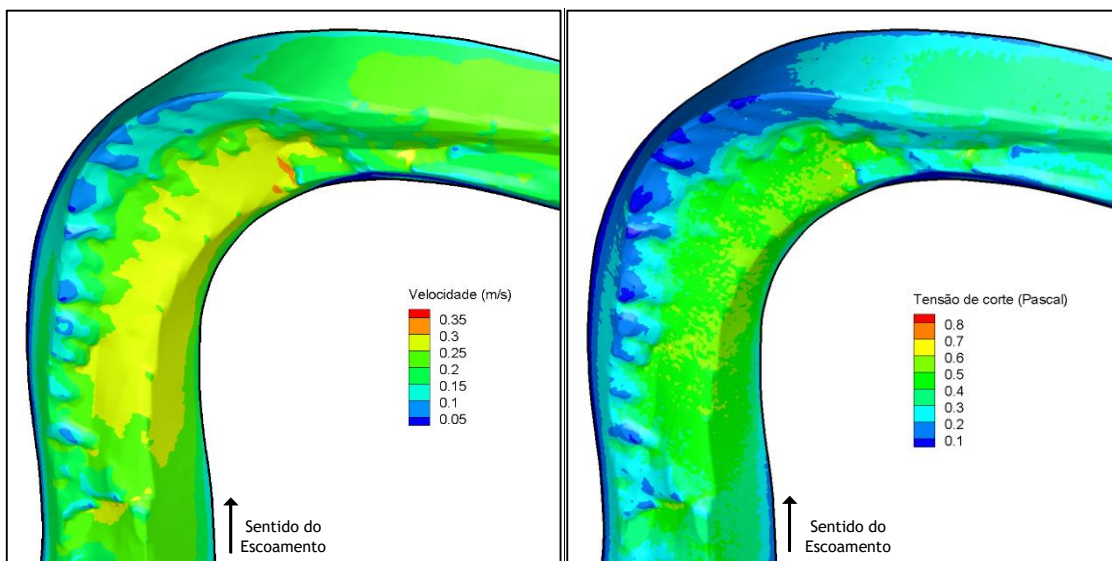


Figura 3.24- Curva sem esporões: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.

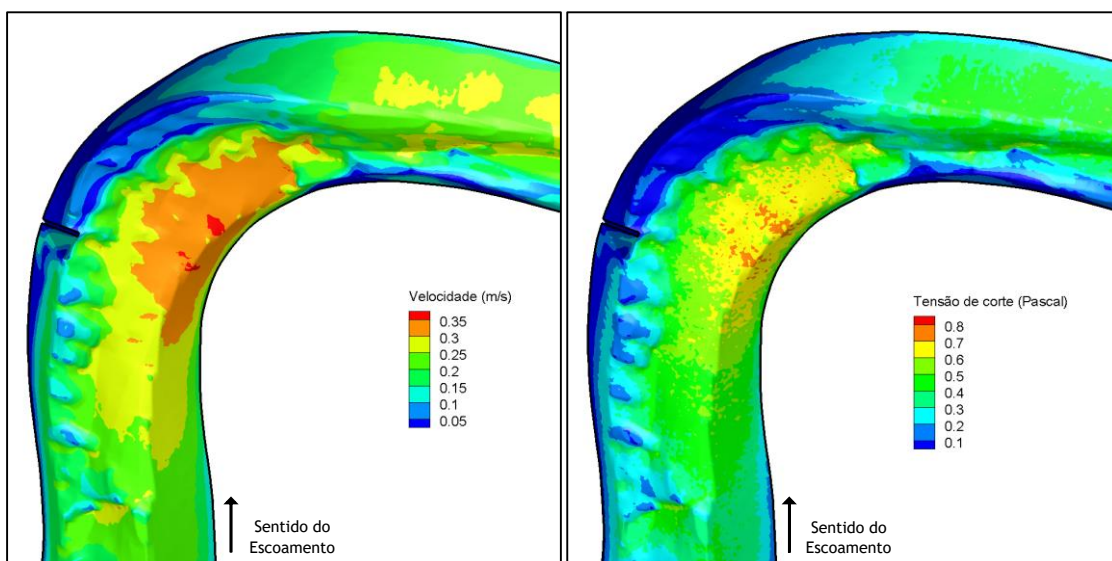


Figura 3.25- Esporão normal e não mergulhante: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.

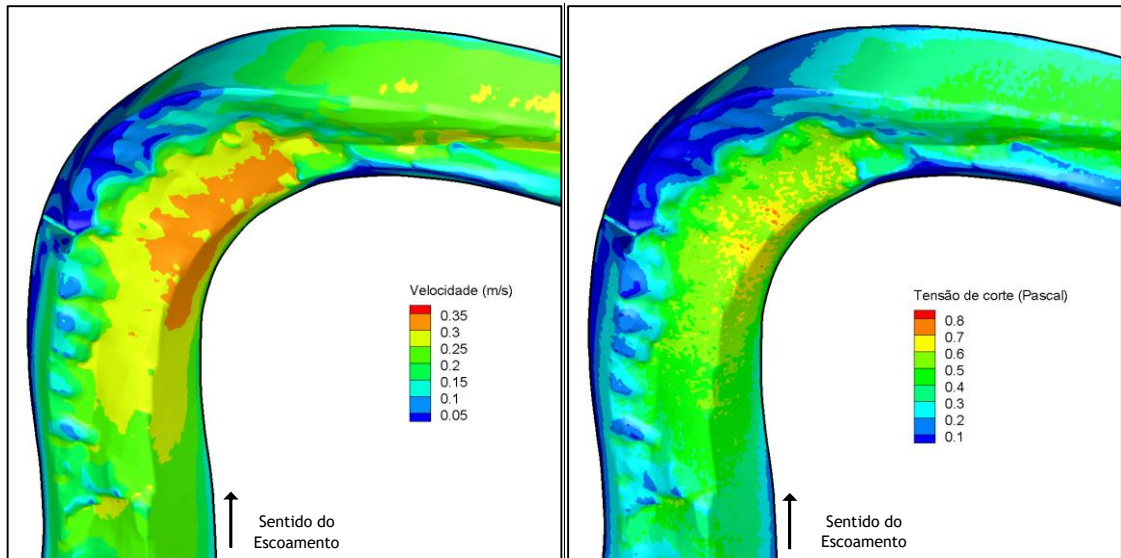


Figura 3.26- Esporão normal e mergulhante 15°: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.

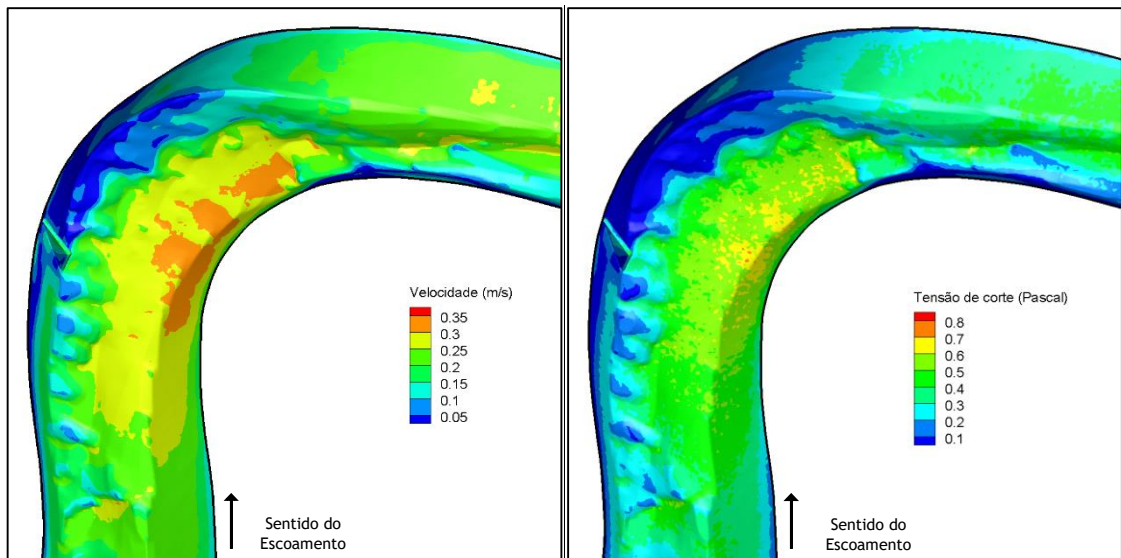


Figura 3.27- Esporão orientado a montante 12° e mergulhante 15°: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.

A análise das referidas figuras permite concluir que nos três casos de esporões estudados se verifica um aumento da velocidade e tensões de corte no intradorso da curva. No que diz respeito à variação da velocidade, o esporão normal e não mergulhante provoca um aumento da velocidade máxima na ordem dos 30%, enquanto que para os esporões mergulhantes este valor é inferior a 15%. Verifica-se ainda uma redução significativa de área afetada pela velocidade máxima para o caso do esporão orientado 120° para montante. Quando analisadas as tensões de corte verifica-se que ocorre um aumento do valor máximo na ordem dos 10% no intradorso da curva para os três casos estudados, sendo uma vez mais o esporão orientado 120° para montante e mergulhante 15° o menos agressivo. Desta análise conclui-se que o esporão mergulhante orientado para montante provoca menor impacto resultante da alteração do

escoamento, garantindo o desvio do escoamento da margem exterior da curva sem um elevado acréscimo de velocidade e tensões de corte no intradorso.

Na sequência da análise anterior, optou-se por analisar a influência de dois campos de esporões, o primeiro constituído por conjunto de dois e o segundo por um conjunto de três. Em ambas as condições se considerou os esporões orientados 120° para montante e um ângulo de mergulho de 15° , espaçados de 50 cm de acordo com o pré-dimensionamento. Foram então desenvolvidas e simuladas as soluções para os dois casos, efetuando-se uma análise idêntica à que foi apresentada anteriormente correspondendo a Figura 3.28 a um campo de dois esporões e a Figura 3.29 a um campo de três esporões.

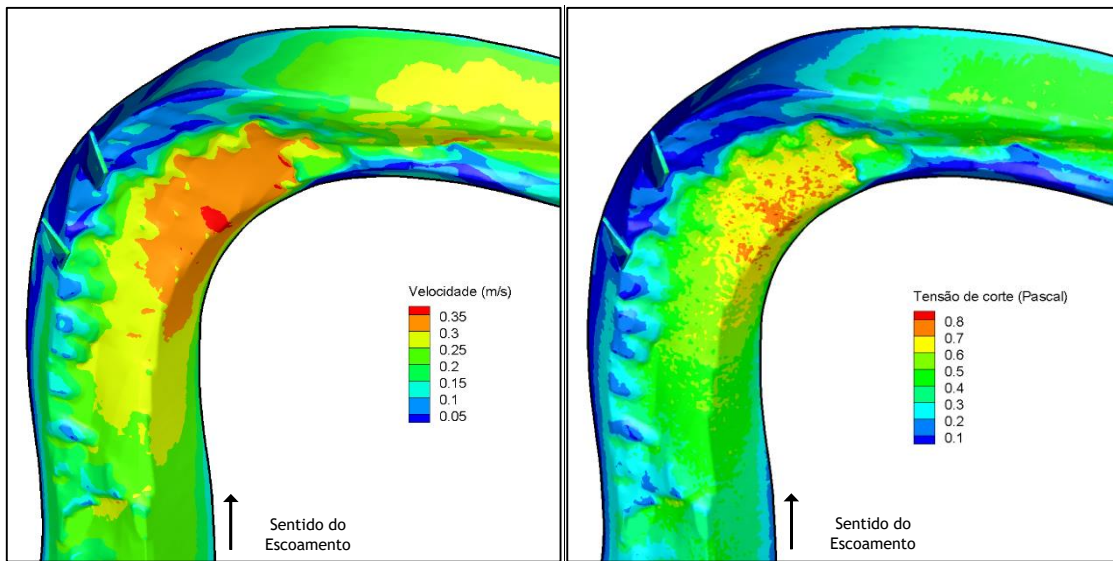


Figura 3.28- Campo de dois esporões: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.

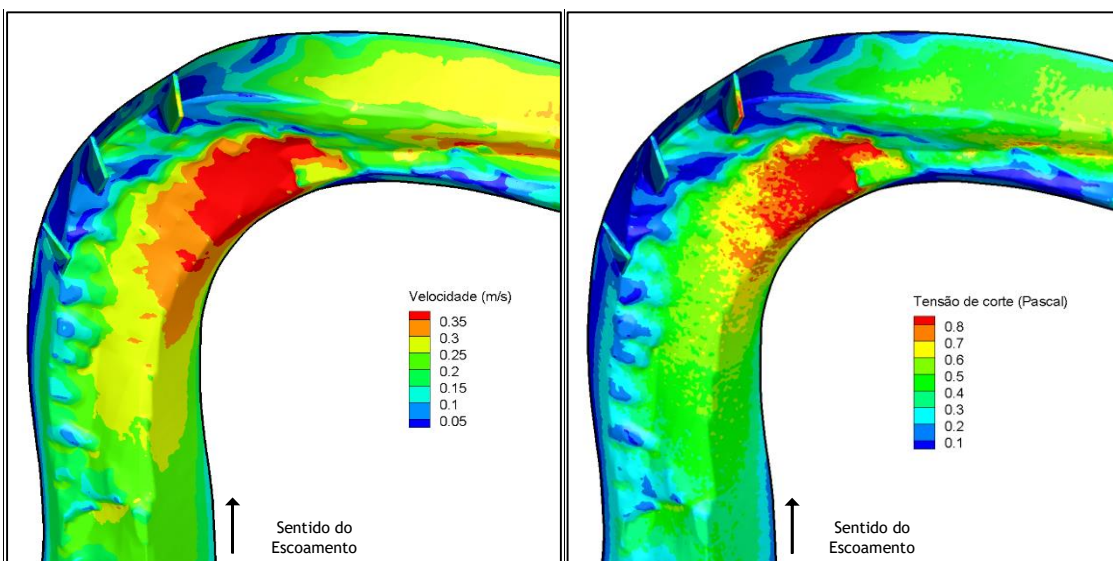


Figura 3.29- Campo de três esporões: a) Campo de velocidades; b) Tensões de corte.

A análise das Figuras 3.28 e 3.29 permite verificar que em ambos os casos analisados ocorre um aumento da velocidade e das tensões de corte no intradorso da curva, sendo a situação mais desfavorável a correspondente ao campo constituído por três esporões. Nesse caso, o último esporão é afeado por tensões de corte elevadas na sua extremidade, podendo levar a problemas de desgaste e estabilidade. Pode-se ainda constatar que este caso leva a maiores velocidades e maiores tensões de corte na zona de saída da curva, podendo afetar negativamente a curva seguinte. Uma vez que o comprimento protegido da margem exterior em ambas as situações analisadas são idênticas, conclui-se que para as condições de fundo fixo impostas neste estudo, a solução de dois esporões se demonstra mais eficiente.

Na Figura 3.30 estão representadas as linhas de corrente verificadas para as duas primeiras curvas do canal sem esporões, sendo visível as zonas de vorticidade expectáveis, uma na face exterior da entrada da primeira curva e a outra na face interior à saída da segunda curva.



Figura 3.30- Linhas de corrente ao longo das duas primeiras curvas do canal.

Por último, apresenta-se na Figura 3.31, a evolução no andamento das linhas de corrente e das velocidades, na envolvente dos esporões, para as diferentes situações analisadas (1 esporão, 2 esporões e 3 esporões). É visível a formação de vórtices na envolvente dos esporões, estando estes associados à alteração da direção e velocidade do escoamento resultante da presença dos esporões, originando-se possivelmente zonas de escavação onde as velocidades são superiores e zonas de sedimentação onde as velocidades tendem a anular-se.

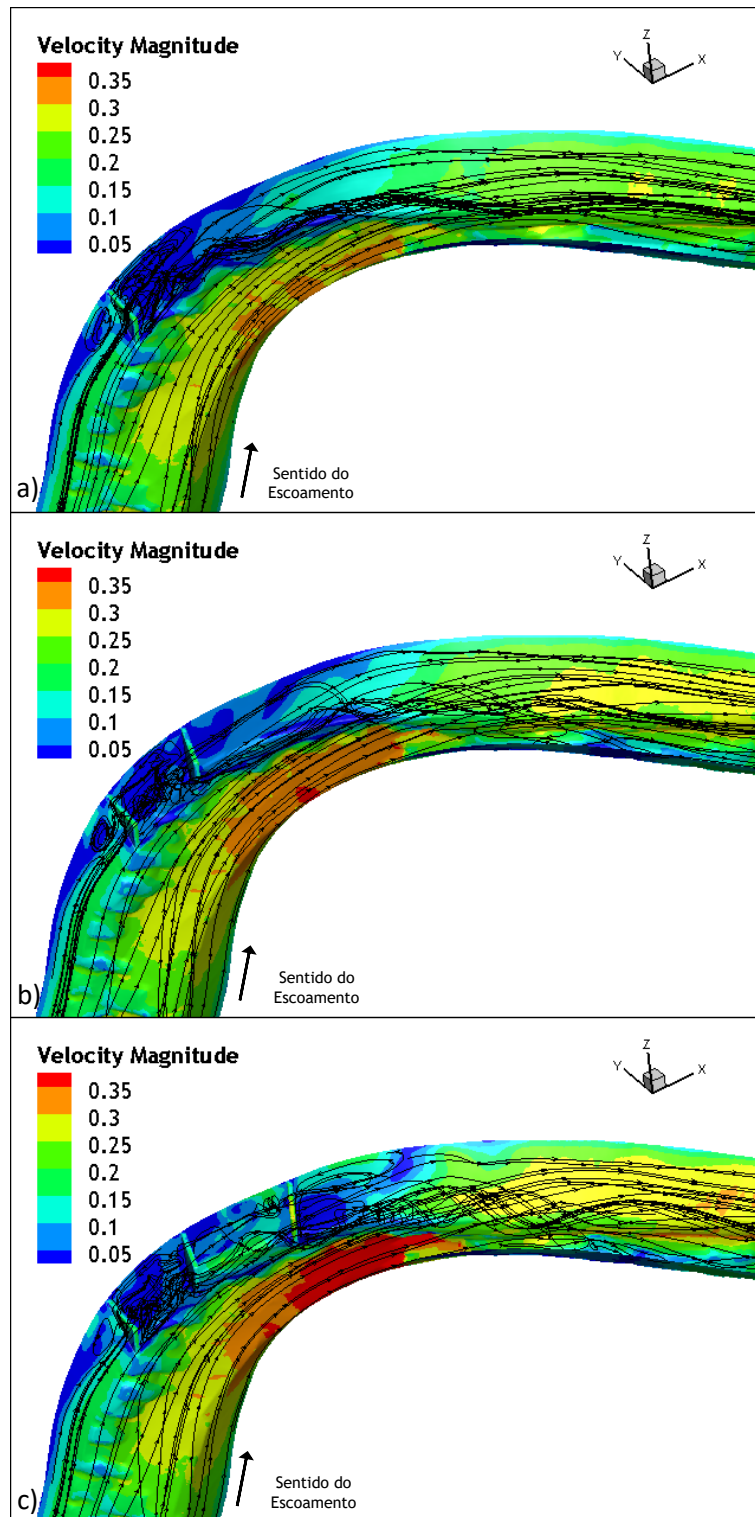


Figura 3.31- Evolução do andamento das linhas de corrente e velocidades para os casos: a) um esporão; b) dois esporões; c) três esporões.

4. Conclusões e propostas de trabalhos futuros

O estudo da influência do espaçamento dos esporões no campo de escoamento do canal meandriforme, existente no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior, foi obtido por simulação numérica com recurso ao *software* Ansys Fluent.

Numa primeira fase validou-se o modelo numérico, tendo-se verificado melhor aproximação quando adotado o modelo de turbulência $k-\omega$ padrão. Validado o modelo representativo do escoamento, procedeu-se ao estudo do impacto resultante da presença do campo de esporões considerado para proteção da margem exterior da segunda curva do canal.

No pré-dimensionamento dos esporões assumiram-se algumas simplificações de modo a reduzir o número de variáveis a considerar neste estudo. Assumiu-se uma espessura de 2 cm uma vez que se desprezou o efeito da forma do esporão. No que diz respeito ao espaçamento entre esporões foram analisadas propostas defendidas por diferentes autores, tendo-se adotado o valor de 50 cm por estar em concordância com os diferentes limites propostos por estes.

Das várias simulações realizadas, concluiu-se que a melhor solução corresponde à situação de esporões mergulhantes orientados para montante. Tendo em conta que este estudo partiu do pressuposto que a geometria do fundo é fixa, concluiu-se que para a proteção da margem exterior da segunda curva, um campo constituído por dois esporões se apresenta mais eficiente e por isso mais vantajoso quando comparado com um campo constituído por três esporões. Salienta-se, no entanto, que a implementação de esporões no seio do escoamento leva a alterações na configuração de fundo e como tal a um novo reajustamento dessas configurações, aspeto não avaliado no presente estudo.

Propõem-se os seguintes trabalhos a desenvolver na linha deste estudo:

- Na componente laboratorial, desenvolver-se um estudo idêntico ao realizado na componente experimental que serviu de base ao presente estudo numérico, adotando a solução do campo de esporões preconizada na presente dissertação, de forma a verificar se os resultados obtidos nestas simulações mantêm o mesmo grau de aproximação que se conseguiu obter na validação do modelo numérico desenvolvido;
- Proceder a simulações testando outros espaçamentos entre esporões, seguindo a metodologia apresentada na presente dissertação;
- Ainda na componente de simulação numérica, desenvolver a mesma metodologia partido de outras geometrias para os esporões;
- Desenvolver a componente experimental e numérica para o este canal com o fundo móvel.

Bibliografia

- [1] J. P. dos S. Monge, “Análise da Eficiência de Estruturas de Proteção de Margens,” FEUP, 2014.
- [2] “Hydraulic Part 2/7 - ANSYS CFX - Hydropower CFD simulation.” [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=D6OQbATy_gQ.
- [3] J. D. Anderson, *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. 1995.
- [4] J. L. C. Fachadas, “Análise de Vários Modelos Numéricos de Captura de Superfície Livre e Aplicação a um Dispositivo Conversor de Energia do Tipo Coluna de Água Oscilante,” FCT-UNL, 2012.
- [5] D. R. F. Tiago, “Simulação Tridimensional de Escoamentos Fluviais,” 2011.
- [6] CIRIA, CUR, and CETMEF, *L’utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques Version française du Rock Manual*, 2e édition. 2009.
- [7] G. Brighetti and J. R. S. Martins, “Estabilização e Proteção de Margens,” 2001.
- [8] A. Vidal, “Metodologia de Avaliação de Quantidades de Trabalho na Manutenção e Reparação de Estruturas de Defesa Costeira com Taludes,” FEUP, 2009.
- [9] R. dos S. Berni, “Uso do Gabião para Proteção de Margens de Cursos d’água: O Caso do Rio Tietê,” Universidade Anhembi Morumbi, 2007.
- [10] J. A. M. Álvarez and M. G. Flores, *Estabilizacion y Rectificacion de Rios*.
- [11] H. Azinfar, “Flow Resistance and Associated Backwater Effect Due To Spur Dikes in Open Channels,” University of Saskatchewan, Saskatoon, 2010.
- [12] A. Sukhodolov, W. S. J. Uijtewaal, and C. Engelhardt, “On the Correspondence Between Morphological and Hydrodynamical Patterns of Groyne Fields,” *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 27, no. 3, pp. 289–305, 2002.
- [13] J. F. A. de Souza, L. R. de Oliveira, J. L. L. de Azevedo, I. D. Soares, and M. M. Mata, “Uma Revisão Sobre a Turbulência e Sua Modelagem,” *Rev. Bras. Geofis.*, vol. 29, pp. 21–41, 2011.
- [14] I. ANSYS, *No Title Introductory FLUENT Training*.
- [15] M. A. C. da S. Azevedo, “Estudos preliminares sobre ejeção de vórtices em torno de um cilindro no regime turbulento com separação laminar,” *Feup*, 2011.
- [16] P. X. C. Ramos, “Modelação Numérica do Escoamento em Torno de um Pilar,” FEUP, 2012.

- [17] N. D. F. Gonçalves, “Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas,” FC, 2007.
- [18] J. Aguirre, “Malhas estruturadas e não-estruturadas vs. malhas tetraédricas e hexaédricas,” <http://aguirreeng.blogspot.pt/2010/09/malhas-estruturadas-e-nao-estruturadas.html>, 2010.
- [19] S. A. Vicario, “Caracterización del flujo en un canal meandriforme,” 2016.
- [20] A. R. Felices, “Defensas fluviales con espigones,” 2015.