



Gonçalo Lança Rodrigues Baeta

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Estudo numérico de escoamento turbulento
numa confluência fluvial utilizando o modelo LES**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Moisés Gonçalves de Brito, Mestre em Engenharia
Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias
Arguente: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde
Vogal: Mestre Moisés Gonçalves de Brito



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2018

Estudo numérico de escoamento turbulento numa confluência fluvial utilizando o modelo LES

Copyright © Gonçalo Lança Rodrigues Baeta, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*I have not failed.
I've just found 10,000 ways that won't work.*
Thomas A. Edison

AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro Moisés Brito, meu orientador e mentor, que pelos conhecimentos e conselhos proporcionados, quer a nível técnico quer pessoal, ao longo destes meses de trabalho, com o seu incondicional apoio tornou possível a execução desta dissertação. Destaco em todo este processo, a sua dedicação, disponibilidade, motivação e exigência, fatores importantíssimos para a autoestima e confiança que fui ganhando ao longo deste trabalho.

Ao Professor Luís Gil, co-orientador sempre presente, pelos seus oportunos conselhos, pelos seus conhecimentos e apoio em todas as fases desta dissertação.

A todo o departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia, ao Professor Daniel Vaz e a todos os outros Professores, pelos conhecimentos transmitidos, pelo excelente ambiente de trabalho e pela disponibilização de meios técnicos, fatores que no seu conjunto foram essenciais para a conclusão do meu percurso académico.

À minha família, por todo o apoio que me têm dado ao longo da vida. Especialmente aos meus pais.

Agradeço aos meus amigos e colegas, que estiveram sempre disponíveis e presentes, apoiando-me quer nos momentos de tensão, quer nos bons momentos de descontração que me proporcionaram.

RESUMO

As confluências são zonas onde ocorre importante mistura entre os escoamentos do canal principal (MC) e do canal secundário (TC). Estas zonas estão presentes em diversos cursos naturais de água e aplicações de engenharia. As interações que ocorrem entre os escoamentos desenvolvem uma estrutura turbulenta complexa que pode apresentar, principalmente, seis características: a zona de estagnação, de deflexão, de separação, de velocidade máxima, a camada de mistura (MI) e a zona de recuperação. Os processos que ocorrem nos escoamentos em confluências dependem de vários parâmetros, o que torna muito complexo o seu estudo. Deste modo a simulação numérica constitui uma ferramenta importante para o estudo deste tipo de escoamentos.

A presente dissertação tem como principal objetivo aplicar e validar o modelo Large Eddy Simulation (LES) no estudo do escoamento turbulento numa confluência fluvial. As simulações foram realizadas recorrendo ao *software* OpenFOAM que, em conjunto com o *solver* *pisoFOAM* resolvem as equações de Navier-Stokes com base no modelo LES.

Nesta dissertação o modelo numérico é validado comparando os seus resultados com os dados experimentais. Os resultados numéricos apresentam boa concordância com os dados experimentais e reproduzem todos os padrões de escoamento importantes numa confluência. Concluindo-se assim, que o modelo LES simula com precisão escoamentos 3D de confluências fluviais. A análise dos resultados numéricos permitiu ainda concluir que a MI deve a sua formação às instabilidades de Kelvin-Helmholtz e que o modelo LES é uma ferramenta necessária no estudo de estruturas turbulentas instantâneas.

Palavras-chave: Large Eddy Simulation (LES), confluência fluvial, estrutura turbulenta, camada de mistura (MI), OpenFOAM

ABSTRACT

Confluences are zones where significant flow interactions between the main channel (MC) and tributary channel (TC) occur. These zones are present in various natural water courses and engineering applications. The interactions between flows generate a complex turbulent structure that results in the development of the stagnation, deflection, separation, shear layer (MI), maximum velocity and recovery zones. The hydrodynamic processes in these zones are controlled by several variables, which makes their study challenging. Therefore, numerical simulation is an important tool to study flows on confluences.

The main goal of this dissertation is the validation of Large-Eddy Simulation (LES) model for turbulent flow at open-channel confluences. The simulations were carried out using OpenFOAM *software* which, together with the *solver pisoFOAM*, solved the Navier-Stokes equations based on the LES model.

In this dissertation the numerical model is validated by comparing the numerical results with the experimental data. The numerical results shows a good agreement with the experimental data, reproducing all important flow patterns at the vicinity of the confluence. This gives sufficient confidence to use the model to study the 3D flow at open-channel confluences. With the analysis of the numerical results it was possible to conclude that the MI is generated due to Kelvin-Helmholtz instabilities, and also that the LES model is an important tool in the study of instantaneous turbulent flow.

Keywords: Large Eddy Simulation (LES), confluence, turbulent flow, shear layer(MI), OpenFOAM

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Abreviaturas e lista de símbolos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do trabalho	1
1.2 Objectivos	4
1.3 Metodologia	4
1.4 Estrutura da Dissertação	5
2 Revisão bibliográfica	7
2.1 Descrição do escoamento em confluências	7
2.1.1 Zona de estagnação do escoamento	8
2.1.2 Zona de deflexão do escoamento	9
2.1.3 Zona de separação do escoamento	10
2.1.4 Zona de velocidade máxima do escoamento	13
2.1.5 Camada de mistura	14
2.1.6 Zona de recuperação do escoamento	16
2.2 Estudo experimental do escoamento em confluências	17
2.3 Estudo numérico do escoamento em confluências	18
3 Método numérico	21
3.1 Código numérico	21
3.1.1 OpenFOAM	21
3.1.2 Solver pisoFoam	22
3.2 Equações fundamentais do modelo LES	23
3.3 Domínio computacional	25
3.3.1 Descrição da malha	25
3.3.2 Condições de fronteira	26

3.3.3	Parâmetros numéricos	27
4	Validação do modelo numérico	29
4.1	Instalação experimental	29
4.2	Comparação dos resultados numéricos e dados experimentais . . .	31
4.3	Considerações finais	42
5	Análise dos resultados numéricos	45
5.1	Intensidades turbulentas	45
5.2	Estabilidade adimensional	48
5.3	Vorticidade vertical	51
5.4	Vorticidade longitudinal	53
5.5	Anisotropia do escoamento	55
6	Conclusões e trabalhos futuros	61
6.1	Conclusões	61
6.2	Trabalhos futuros	63
	Bibliografia	65
I	Árvore de diretorias do caso de estudo do OpenFOAM	69
II	Código para organizar a base de dados dos valores médios	71
III	Código para tratar os resultados da base de dados dos valores médios	75
IV	Código para organizar a base de dados dos valores instantâneos	81
V	Código para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos	85

LISTA DE FIGURAS

1.1	Artigos publicados sobre as confluências entre 1980 e 2005. Adaptada de Stephen Rice e Rhoads (2008).	2
1.2	Confluência dos rios Mosoni-Duna (a) e Rába (b). A elipse representa a zona onde ocorre a sobrelevação da superfície livre, devido à camada de mistura que se desenvolve a jusante da confluência dos dois escoamentos. Adaptada de Baranya et al. (2013).	3
1.3	Fluxograma do código usado para tratar os dados: a) fluxograma organizacional das velocidades instantâneas; b) tratar resultados.	6
2.1	Esquema das principais características do escoamento numa confluência fluvial assimétrica. Adaptado de Best (1987).	8
2.2	Esquema das linhas de corrente numa confluência assimétrica. A elipse representa a deflexão do escoamento. Adaptado de Biron et al. (1996b).	9
2.3	Modelo conceptual da zona de separação em confluências fluviais. Adaptado de (Shakibainia et al., 2010).	11
2.4	Secção transversal do MC mostrando o padrão do escoamento e as correntes secundárias nas confluências para $Q_r = 0.5$ e com dois ângulos de confluência (α) diferentes: a) $\alpha = 45^\circ$; b) $\alpha = 90^\circ$. Onde u é a componente da velocidade na direcção longitudinal e U é a velocidade média do escoamento. Adaptada de (Shakibainia et al., 2010).	13
2.5	Intensidade turbulenta da componente de velocidade na direcção longitudinal em três alturas diferentes: $z/B_{MC} = 0.06$ (linhas contínuas), $z/B_{MC} = 0.38$ (linhas de pontos) e $z/B_{MC} = 0.81$ (linhas tracejadas): a) leitos concordantes; b) leitos discordantes com um degrau de 90° ; c) leitos discordantes com uma rampa de 45° . O sentido do escoamento é da direita para a esquerda. Adaptada de (Biron et al., 1996b).	15
3.1	Domínio computacional, malha e condições de fronteira.	26
4.1	MC e TC com o carro de apoio à medição. As setas indicam as direcções do escoamento do TC e do MC.	30

4.2	Vista de plano do esquema dos canais da confluência com a malha das medições.	31
4.3	Magnitudes das velocidades médias adimensionais na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.18$: a) experimental; b) numérico.	32
4.4	Magnitudes das velocidades médias adimensionais na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.48$: a) experimental; b) numérico.	33
4.5	Magnitudes das velocidades médias adimensionais na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$: a) experimental; b) numérico.	34
4.6	Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção transversal $x/B_{MC} = 0$: a) experimental; b) numérico.	35
4.7	Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção transversal $x/B_{MC} = 0.16$: a) experimental; b) numérico.	36
4.8	Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção transversal $x/B_{MC} = 0.25$: a) experimental; b) numérico.	36
4.9	Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção transversal $x/B_{MC} = 0.45$: a) experimental; b) numérico.	37
4.10	Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção transversal $x/B_{MC} = 1$: a) experimental; b) numérico.	37
4.11	Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.18$: a) experimental; b) numérico.	38
4.12	Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.48$: a) experimental; b) numérico.	39
4.13	Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$: a) experimental; b) numérico.	40
4.14	Magnitudes das velocidades médias adimensionais na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$: a) experimental; b) numérico.	41
4.15	Componente transversal adimensional da velocidade média na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$: a) experimental; b) numérico.	42
5.1	Componente longitudinal adimensional da intensidade turbulenta nas secções longitudinais: a) $z/H_{MC} = 0.18$; b) $z/H_{MC} = 0.48$; c) $z/H_{MC} = 0.65$	46
5.2	Componente transversal adimensional da intensidade turbulenta nas secções longitudinais: a) $z/H_{MC} = 0.18$; b) $z/H_{MC} = 0.48$; c) $z/H_{MC} = 0.65$	47
5.3	Perfil da componente longitudinal da velocidade média nas secções transversais: a) $x/B_{MC} = 0.16$; b) $x/B_{MC} = 0.25$; c) $x/B_{MC} = 0.45$; d) $x/B_{MC} = 1$	50

5.4	Vorticidade vertical instantânea adimensional na secção longitudinal $z/B_{MC} = 0.65$ para três instantes de tempo diferentes: a) $t = 0$ s; b) $t = 10$ s; c) $t = 20$ s.	52
5.5	Vorticidade vertical média adimensional na secção longitudinal $z/B_{MC} = 0.65$	53
5.6	Vorticidade longitudinal instantânea adimensional na secção transversal $x/B_{MC} = 0.25$ para três instantes de tempo diferentes: a) $t = 0$ s; b) $t = 10$ s; c) $t = 20$ s.	54
5.7	Vorticidade longitudinal média adimensional nas secções transversais: a) $x/B_{MC} = 0.16$; b) $x/B_{MC} = 0.25$	55
5.8	Triângulo de Lumley. Adaptado de Mera et al. (2015).	56
5.9	Parâmetro J em seis secções transversais: a) $x/B_{MC} = -0.2$; b) $x/B_{MC} = 0$; c) $x/B_{MC} = 0.16$; d) $x/B_{MC} = 0.25$; e) $x/B_{MC} = 0.45$; f) $x/B_{MC} = 1$	57
5.10	Distribuição dos invariantes de anisotropia nas secções transversais: a) $x/B_{MC} = 0.16$; b) $x/B_{MC} = 0.25$; c) $x/B_{MC} = 0.45$; d) $x/B_{MC} = 1.00$. Azul corresponde a $0 < z/H_{MC} < 0.33$, cor-de-laranja para $0.33 < z/H_{MC} < 0.66$ e amarelo para $0.66 < z/H_{MC} < 1$	59
I.1	Diagrama de diretorias em árvore que representa o conjunto de pastas e ficheiros usados pelo OpenFOAM para correr a simulação final.	70
II.1	Parte 1 do código usado para organizar numa base de dados os valores médios.	72
II.2	Parte 2 do código usado para organizar numa base de dados os valores médios.	73
II.3	Parte 3 do código usado para organizar numa base de dados os valores médios.	74
III.1	Parte 1 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores médios.	76
III.2	Parte 2 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores médios.	77
III.3	Parte 3 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores médios.	78
III.4	Parte 4 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores médios.	79
IV.1	Parte 1 do código usado para organizar numa base de dados os valores instantâneos.	82

IV.2	Parte 2 do código usado para organizar numa base de dados os valores instantâneos.	83
V.1	Parte 1 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	86
V.2	Parte 2 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	87
V.3	Parte 3 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	88
V.4	Parte 4 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	89
V.5	Parte 5 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	90
V.6	Parte 6 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	91
V.7	Parte 7 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	92
V.8	Parte 8 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	93
V.9	Parte 9 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	94
V.10	Parte 10 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	95
V.11	Parte 11 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	96
V.12	Parte 12 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	97
V.13	Parte 13 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.	98

LISTA DE TABELAS

3.1	Caudais nas fronteiras e propriedades do fluido.	27
3.2	Parâmetros numéricos usados no estudo numérico.	27

ABREVIATURAS E LISTA DE SÍMBOLOS

- $\bar{\omega}_x$ vorticidade longitudinal média adimensional (-)
- $\bar{\omega}_z$ vorticidade vertical média adimensional (-)
- \bar{U}_{xy}/U velocidade média adimensional da secção longitudinal (-)
- \bar{u}/U componente longitudinal adimensional da velocidade média (-)
- \bar{v}/U componente transversal adimensional da velocidade média (-)
- \bar{w}/U componente vertical adimensional da velocidade média (-)
- α ângulo de confluência (°)
- ω_x vorticidade longitudinal instantânea adimensional (-)
- ω_z vorticidade vertical instantânea adimensional (-)
- B_c largura da zona de contração (m)
- B_s largura da zona de separação (m)
- C_k constante de Kolmogorov (-)
- C_s constante de Smagorinsky (-)
- G operação de filtro
- H_{MC} profundidade de escoamento no MC (m)
- H_{TC} profundidade de escoamento do TC (m)
- H_r rácio de profundidade (-)
- I_x componente longitudinal da intensidade turbulenta média (-)
- I_y componente transversal da intensidade turbulenta média (-)
- L_s comprimento da zona de separação (m)

Q_{MC} caudal do canal principal (m^3/s)

Q_T caudal total da confluência (m^3/s)

Q_{TC} caudal do canal tributário (m^3/s)

Q_r rácio do caudal (-)

S_W estabilidade adimensional (-)

S_{mi} estabilidade adimensional da MI (-)

V_{MC} velocidade do MC (m/s)

V_{TC} velocidade do TC (m/s)

V_r rácio da velocidade (-)

u' componente longitudinal das flutuações da velocidade (m/s)

v' componente transversal das flutuações da velocidade (m/s)

x Coordenada cartesiana

y Coordenada cartesiana

z^+ coordenada vertical adimensional

ADV Acoustic Doppler Velocimeter

CFD dinâmica dos fluidos computacional

DNS Direct Numerical Simulation

LES Large Eddy Simulation

MC Canal Principal

MI Camada de Mistura

PISO Pressure Implicit with Splitting of Operators

RANS Reynolds-averaged Navier-Stokes

RMS valor eficaz

RNG $k - \varepsilon$ modificado

SGS escala da sub-malha

SIMPLE Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

TC Canal Tributário

VOF Volume of Fluid

INTRODUÇÃO

Neste capítulo faz-se uma introdução que fornece uma visão global do trabalho desenvolvido. Inicialmente realiza-se um enquadramento do trabalho. Seguidamente, apresentam-se os objectivos principais e a metodologia adoptada. Por fim, descreve-se a estrutura desta dissertação, especificando os conteúdos de cada capítulo.

1.1 Enquadramento do trabalho

As confluências de sistemas fluviais são zonas onde ocorre mistura do escoamento do canal principal (MC) e de um ou mais canais tributários (TC). Nestas zonas ocorrem mudanças significativas nas características do escoamento, tanto na zona adjacente ao TC, como a jusante e a montante do TC (Best, 1988; Constantinescu et al., 2011; Guillén, 2015). A forma e o motivo da ocorrência destas mudanças são questões fundamentais para compreender o escoamento nas confluências de sistemas fluviais. Assim, ao longo das últimas décadas as confluências têm sido alvo de vários estudos, com objetivo de compreender os mecanismos que controlam: a estrutura do escoamento, o transporte e deposição de sedimentos, as mudanças nos canais e a mistura do escoamento (Best, 1987; Best, 1988; Best e Reid, 1984; Biron et al., 1993; Bradbrook et al., 2000a; Bradbrook et al., 2001; Constantinescu et al., 2011; Rhoads e Sukhodolov, 2004; Rhoads e Sukhodolov, 2008).

No entanto, só a partir da década de 1980 é que o interesse no estudo das confluências aumentou significativamente (Stephen Rice e Rhoads, 2008). A Figura 1.1 mostra o aumento substancial do volume de artigos publicados dos estudos

analíticos, experimentais e numéricos sobre as confluências.

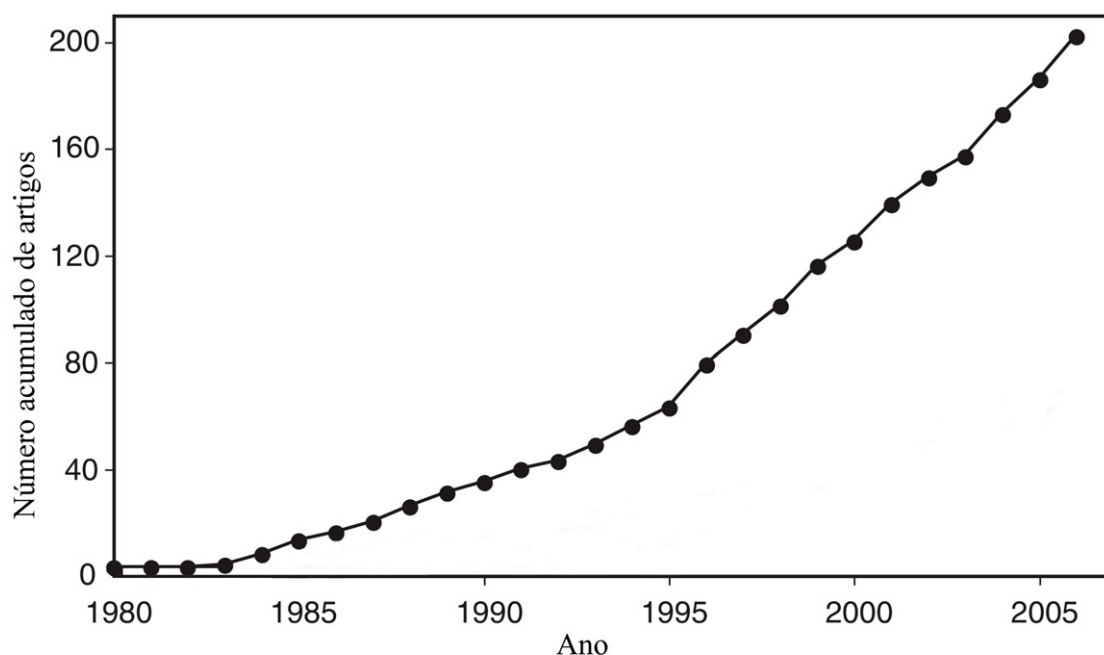


Figura 1.1: Artigos publicados sobre as confluências entre 1980 e 2005. Adaptada de Stephen Rice e Rhoads (2008).

A estrutura do escoamento em confluências é complexa, gerando controvérsia sobre a importância que alguns fenômenos têm na estrutura do escoamento (Rhoads e Sukhodolov, 2001). Em geral, esta controvérsia tem origem no desacordo entre alguns investigadores, relativamente: à presença ou ausência de movimento helicoidal; ao processo responsável por este movimento, caso exista; aos métodos usados para detetar este movimento em estudos de rios naturais (Biron et al., 1996a; Biron et al., 1996b; Lane et al., 2000; Rhoads e Kenworthy, 1995; Rhoads e Sukhodolov, 2001).

Uma vez que as confluências encontram-se ligadas à dispersão de poluentes, foi dada especial importância a este fenómeno quando ocorreu uma falha no depósito que continha lama vermelha da fábrica de alumina em Kolontár na Hungria. Esta falha resultou no derrame de milhões de metros cúbicos de lama vermelha em Outubro de 2012 (Baranya et al., 2013). Apesar das atividades de descontaminação artificial, as confluências ao longo do percurso dos rios (nomeadamente as confluências dos rios Torna e Marcal, dos rios Marcal e Rába, dos rios Rába e Mosoni-Duna e dos rios Mosoni-Duna e Danubio) tiveram um papel crucial nos processos naturais de mistura e separação da lama vermelha. A Figura 1.2 mostra uma fotografia aérea de uma das confluências afetadas, entre os rios Mosoni-Duna e Rába, onde pode-se observar claramente os vórtices associados à

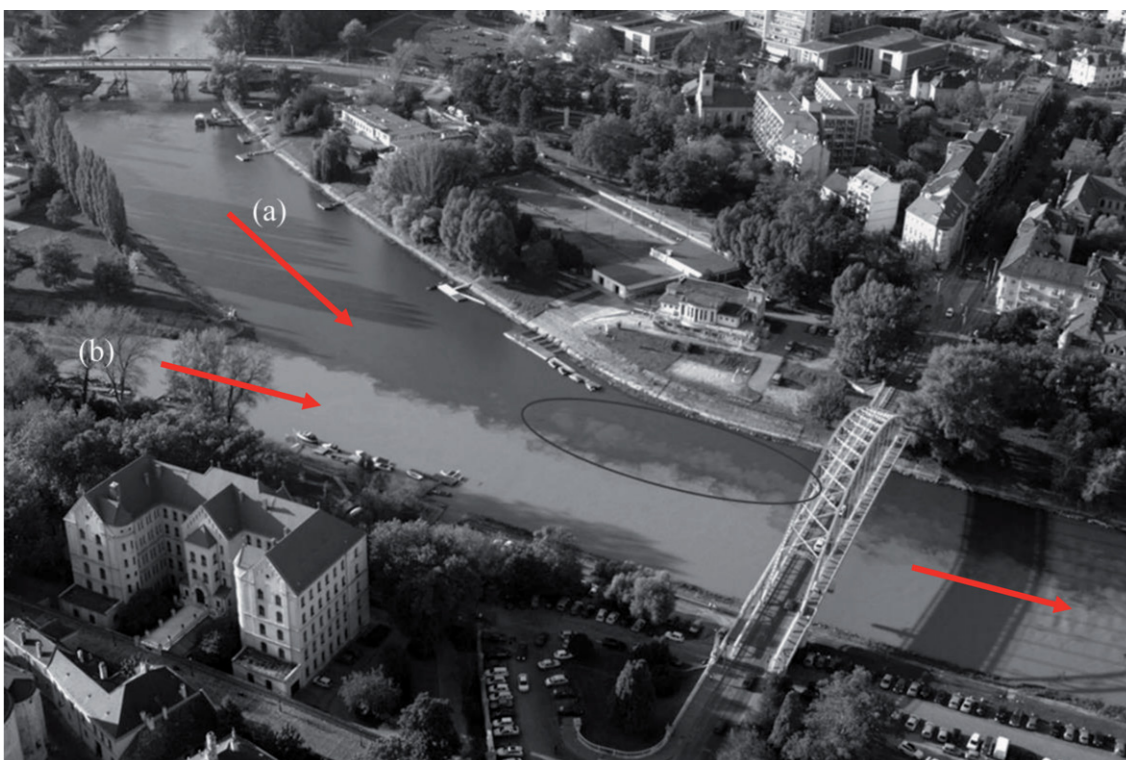


Figura 1.2: Confluência dos rios Mosoni-Duna (a) e Rába (b). A elipse representa a zona onde ocorre a sobrelevação da superfície livre, devido à camada de mistura que se desenvolve a jusante da confluência dos dois escoamentos. Adaptada de Baranya et al. (2013).

camada de mistura (MI).

Segundo Baranya et al. (2013) o derrame de lama vermelha chamou a atenção para reconsiderar os planos de desastre, dando especial importância aos processos de mistura e separação ao longo dos rios afetados. Portanto, uma melhor compreensão do transporte de sedimentos e do escoamento nas confluências tem implicações fundamentais, não só para a proteção do leito da confluência, mas também para melhorar a dispersão de poluentes (Best, 1988). Assim, o interesse no estudo das confluências deriva do reconhecimento que estas zonas são componentes integrais de sistemas fluviais, de estruturas de redes de drenagem e de canais de aquacultura. Acresce também o facto da crescente consciência que a dinâmica das confluências desempenha um papel importante no controlo do escoamento e do transporte de sedimentos nos sistemas fluviais (Rhoads e Sukhodolov, 2001).

Apesar de grande parte dos estudos anteriores focarem-se na caracterização da MI, existem muitos parâmetros que se tem de ter em consideração no estudo das confluências. Acresce ainda o facto do escoamento a jusante da confluência pode ser afetado por diversos fatores, como por exemplo, leito com sedimentos, leitos

com profundidades diferentes e ângulos de confluência não naturais (ângulos superiores a 90°). Uma vez que o ângulo de 70° é mais comum, é o ângulo utilizado neste estudo. O estudo realizado nesta dissertação foca-se no desenvolvimento do escoamento e não na importância que podem ter esses outros fatores.

1.2 Objectivos

O objetivo principal desta dissertação é aplicar e validar o modelo LES (Large Eddy Simulation) no estudo do escoamento turbulento numa confluência fluvial com o ângulo de intersecção de 70° e com o rácio entre os caudais de 0.11. A geometria estudada apresenta estas características uma vez que as confluências naturais apresentam normalmente ângulos de confluência inferiores a 90° e, portanto, um ângulo de 70° permite estudar as características representativas deste tipo de escoamento. Os objetivos específicos desta dissertação são: descrever as características do escoamento em confluências fluviais; tratar os dados experimentais obtidos por Birjukova et al. (2014); validar os resultados numéricos usando os dados experimentais; analisar e discutir os resultados numéricos.

1.3 Metodologia

As simulações serão realizadas recorrendo ao *software* OpenFOAM (Open source Field Operation and Manipulation). Este *software* permite resolver numericamente as equações Navier-Stokes. Neste trabalho utiliza-se o modelo LES para a modelação da turbulência. A análise dos resultados numéricos e experimentais é realizada através de códigos desenvolvidos pelo autor em Matlab. Com vista a simplificar a compreensão e planeamento dos códigos desenvolvidos, apresentam-se na Figura 1.3 dois fluxogramas de tratamento dos resultados. No primeiro fluxograma (Figura 1.3a) apresenta-se o procedimento para tratar as velocidades instantâneas e no segundo fluxograma (Figura 1.3b) as velocidades instantâneas são organizadas numa secção escolhida (longitudinal, transversal e vertical) e convertidas em diversos parâmetros de forma a estudar o escoamento. Nos Anexos II, III, IV e V apresentam-se os códigos Matlab usados para tratar e organizar os dados. O código desenvolvido permite escrever os ficheiros em formato .dat de modo a serem lidos em Tecplot. O Tecplot permite visualizar os campos do escoamento.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos: Introdução; Revisão bibliográfica; Método numérico; Validação do modelo numérico; Análise dos resultados numéricos; Conclusões e trabalhos futuros. No primeiro capítulo realiza-se uma introdução ao trabalho desenvolvido onde apresenta-se o enquadramento do trabalho, os objetivos, a metodologia adotada e a estrutura da dissertação. No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica relativa às confluências. O terceiro capítulo é dedicado à descrição do *software* OpenFOAM, do *solver* *pi-soFoam* e do modelo LES, apresentado-se as equações fundamentais do modelo LES. Na parte final deste capítulo descreve-se a malha de cálculo e os parâmetros numéricos utilizados. O quarto capítulo é dedicado à instalação experimental e realiza-se a comparação e validação dos resultados numéricos e dados experimentais. No quinto capítulo discutem-se os principais resultados numéricos. O sexto e último capítulo é dedicado às conclusões e às propostas para trabalhos futuros.

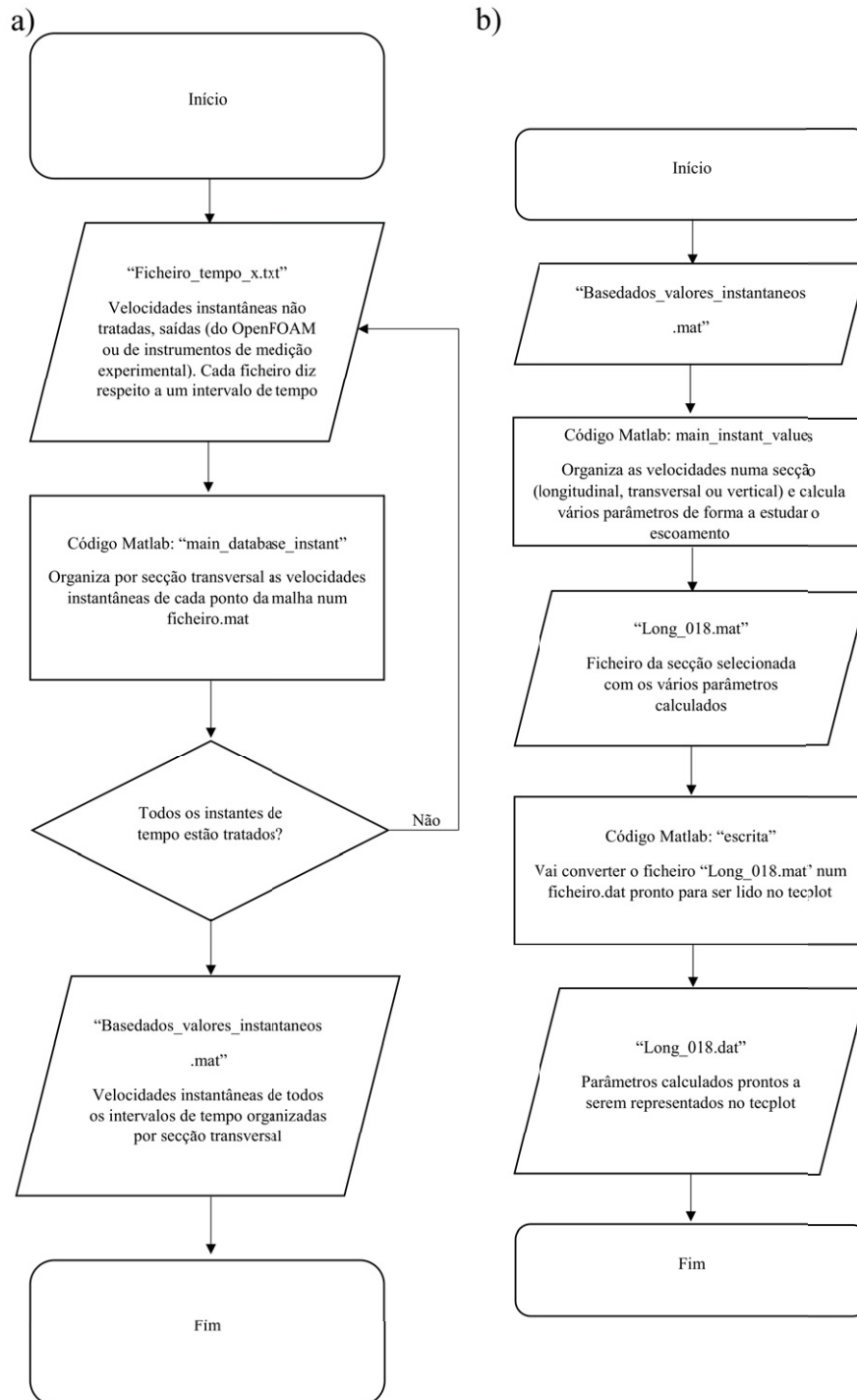


Figura 1.3: Fluxograma do código usado para tratar os dados: a) fluxograma organizacional das velocidades instantâneas; b) tratar resultados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, inicialmente realiza-se uma descrição do escoamento em confluências, sendo identificadas e descritas as diversas zonas presentes neste tipo de escoamentos. Após realizada esta descrição efetua-se uma breve análise sobre os estudos experimentais realizados anteriormente. Por fim identificam-se alguns modelos numéricos que podem ser utilizados para simular o escoamento em confluências.

2.1 Descrição do escoamento em confluências

As confluências são zonas onde ocorre importante mistura entre os escoamentos do MC e do TC. Estas zonas estão presentes em diversos cursos naturais de água e aplicações de engenharia, como por exemplo: canais de adução, de irrigação, de tratamento de água e de transportes de peixes.

As confluências têm um papel fundamental no transporte de sedimentos e nas características do escoamento. As estruturas turbulentas do escoamento em confluências são complexas e existe um elevado número de parâmetros que caracterizam o seu desenvolvimento. Os processos que ocorrem nestes escoamentos variam, com a geometria, com o número de canais tributários e com os seus respectivos caudais. Como por exemplo, o tamanho e a forma dos canais e, a zona de ligação dos leitos do MC e do TC (Huang et al., 2002). Mas segundo Best (1987), os parâmetros que dominam a estrutura do escoamento são: o ângulo de ligação entre o MC e o TC, o caudal do MC (Q_{MC}) e o caudal do TC (Q_{TC}).

As confluências podem ser simétricas ou assimétricas. No entanto, na natureza

grande parte das confluências são assimétricas e, portanto, esta dissertação foca-se no estudo do escoamento em confluências assimétricas. Neste tipo de confluência, as interações de escoamentos do MC e do TC, provocam o desenvolvimento de uma complexa estrutura turbulenta que pode apresentar, principalmente, seis características: (1) zonas de estagnação do escoamento no vértice a montante do TC, (2) deflexão provocada pela entrada do escoamento do TC no MC, (3) separação do escoamento imediatamente a jusante do vértice do TC, (4) velocidade máxima do escoamento, (5) Camada de Mistura (MI) associada ao contacto entre as zonas de separação e velocidade máxima do escoamento e (6) recuperação gradual do escoamento a jusante da zona de separação (Best, 1987). Na Figura 2.1 apresenta-se um esquema das seis características do escoamento numa confluência fluvial. O caudal a montante do TC é definido da seguinte forma, $Q_T = Q_{MC} + Q_{TC}$, onde o Q_{MC} é o caudal do MC e o Q_{TC} é o caudal do TC. Na Figura 2.1 ainda apresentam-se as dimensões B_c que é a largura da zona de contração, B_s que é a largura da zona de separação e L_s que é o comprimento da zona de separação.

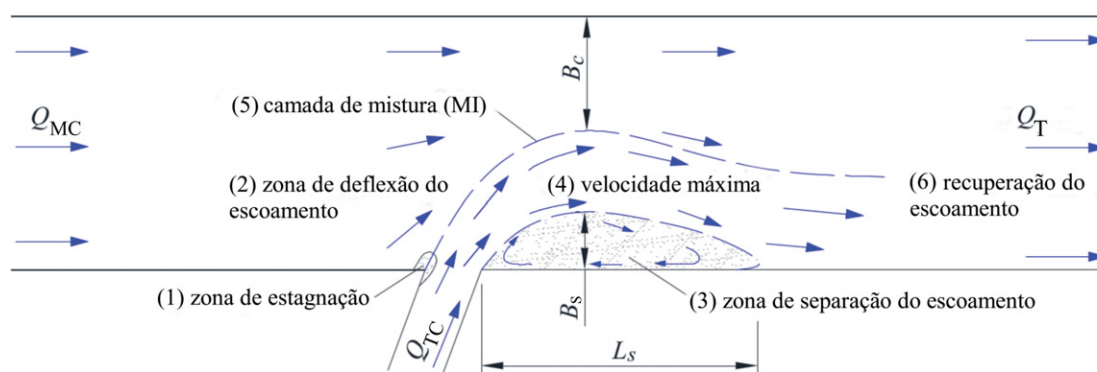


Figura 2.1: Esquema das principais características do escoamento numa confluência fluvial assimétrica. Adaptado de Best (1987).

2.1.1 Zona de estagnação do escoamento

A zona de estagnação encontra-se localizada no MC junto ao vértice a montante do TC. Esta zona é gerada pela deflexão do escoamento provocada pela entrada do escoamento do TC no MC e é caracterizada por uma grande redução da velocidade do escoamento e pela elevação da superfície livre (Best, 1987; Shakibainia et al., 2010).

A elevação da superfície livre indica a estagnação do escoamento na confluência e o início da deflexão do escoamento. Segundo Biron et al. (2002) e Shakibainia et al. (2010) a elevação máxima da superfície livre ocorre na zona de estagnação.

A elevação máxima aumenta com a diminuição da razão entre o Q_{MC} e Q_{TC} definida da seguinte forma, $Q_r = Q_{MC} / Q_{TC}$, e também com o aumento do ângulo de confluência, α (Shakibainia et al., 2010).

Segundo Best (1987), à medida que o ângulo de confluência aumenta, existe um aumento da deflexão do escoamento devido à necessidade das linhas de corrente serem paralelas ao MC, ou seja, a curvatura do escoamento do TC aumenta e, conseqüentemente, vai existir um aumento da zona de estagnação (Huang et al., 2002). Apesar do escoamento nesta zona ser caracterizado pela redução de velocidades, Best (1987) observou que para um ângulo de confluência pouco comum de 105° (isto é, o escoamento do TC entra no MC com a direção oposta) pode existir escoamento contrário na zona de estagnação, devido a curvatura acentuada do escoamento do TC, especialmente para $Q_r < 1.0$. Portanto, nestas condições a zona de estagnação tem um papel fundamental no transporte de sedimentos.

2.1.2 Zona de deflexão do escoamento

A deflexão do escoamento deve-se à entrada do escoamento do TC no MC, que provoca uma curvatura no escoamento. A deflexão aumenta com a diminuição do Q_r e, como foi referido anteriormente, a deflexão aumenta também com o aumento do ângulo de confluência. Um ângulo de 15° mostra que a deflexão pode ser praticamente negativa (Best, 1987). Na Figura 2.2 apresenta-se um esquema da deflexão do escoamento numa confluência assimétrica.

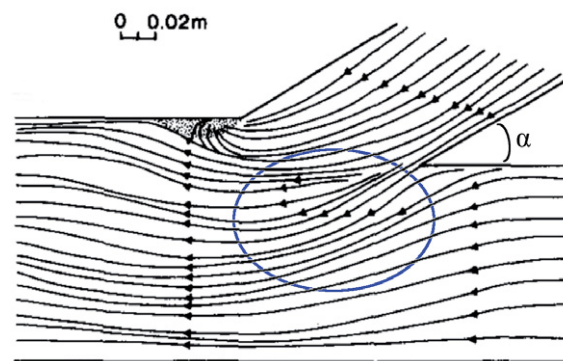


Figura 2.2: Esquema das linhas de corrente numa confluência assimétrica. A elipse representa a deflexão do escoamento. Adaptado de Biron et al. (1996b).

A zona de deflexão do escoamento é caracterizada pela mudança da direção dos vetores de velocidade e pela elevação da superfície livre (Shakibainia et al., 2010).

Uma das conseqüências mais importantes desta zona é a criação de uma Camada de Mistura (MI) entre os dois escoamentos, ao longo da qual desenvolvem-se

vários vórtices verticais (Best, 1987). Estes vórtices são responsáveis pelo aumento das tensões de corte junto ao leito. A combinação destas tensões e o aumento da velocidade do escoamento, é responsável pela erosão dos leitos dos rios.

2.1.3 Zona de separação do escoamento

A zona de separação do escoamento desenvolve-se imediatamente a jusante do vértice do TC. A separação ocorre devido à mudança abrupta do escoamento a jusante do vértice do TC (Best, 1987). À medida que o escoamento avança para jusante, o limite da zona de separação vai-se aproximando da parede (Shakibainia et al., 2010).

A zona de separação do escoamento é provavelmente a zona mais distinta que se forma numa confluência (Best, 1987). Esta zona é caracterizada por pressões inferiores às restantes zonas do MC e, portanto, pela existência de elevadas depressões da superfície livre (Huang et al., 2002; Shakibainia et al., 2010). Nesta zona as velocidades são reduzidas com gradientes de pressões adversos e, pode existir desenvolvimento de recirculação com correntes direcionadas a montante, junto à parede lateral do MC. O escoamento volta-se a unir a jusante (ponto A da Figura 2.3) (Best, 1987; Biron et al., 1996a). Shakibainia et al. (2010) observaram também que a zona de separação pode ser caracterizada por três parâmetros, o comprimento da zona (L_s) entre os pontos A e B da Figura 2.3, a largura máxima da zona (B_s) distância da parede ao ponto C e a altura em que a largura do escoamento é máxima (Z_s) entre o leito do MC e o ponto F. Os parâmetros que caracterizam a zona de separação estão apresentados na Figura 2.3.

A largura e o comprimento da zona de separação aumentam com o aumento do ângulo de confluência e com a diminuição do Q_r (Best, 1987; Shakibainia et al., 2010). Best (1987) mostra que a zona de separação pode chegar a ocupar metade da largura do MC. A taxa a que a zona de separação aumenta torna-se mais baixa à medida que o Q_r diminuí. Este efeito é provocado pela redução de pressão dentro da zona de separação e pela limitação da largura do MC (Best, 1987). Shakibainia et al. (2010) mostra que quanto maior for o Q_r , menor vai ser a dimensão da zona de separação. Com o aumento do Q_r o escoamento do TC vai ter menos influência no MC (Huang et al., 2002).

A localização da largura máxima da zona de separação encontra-se junto à superfície livre e, como expectável, menor junto ao leito (Huang et al., 2002). O aumento da zona de separação para ângulos entre 45° e 90°, é geralmente proporcional ao Q_r , isto é, quando existe um ângulo fixo de 70°, o aumento do comprimento e largura da zona de separação vai ser proporcional ao Q_r (Best,

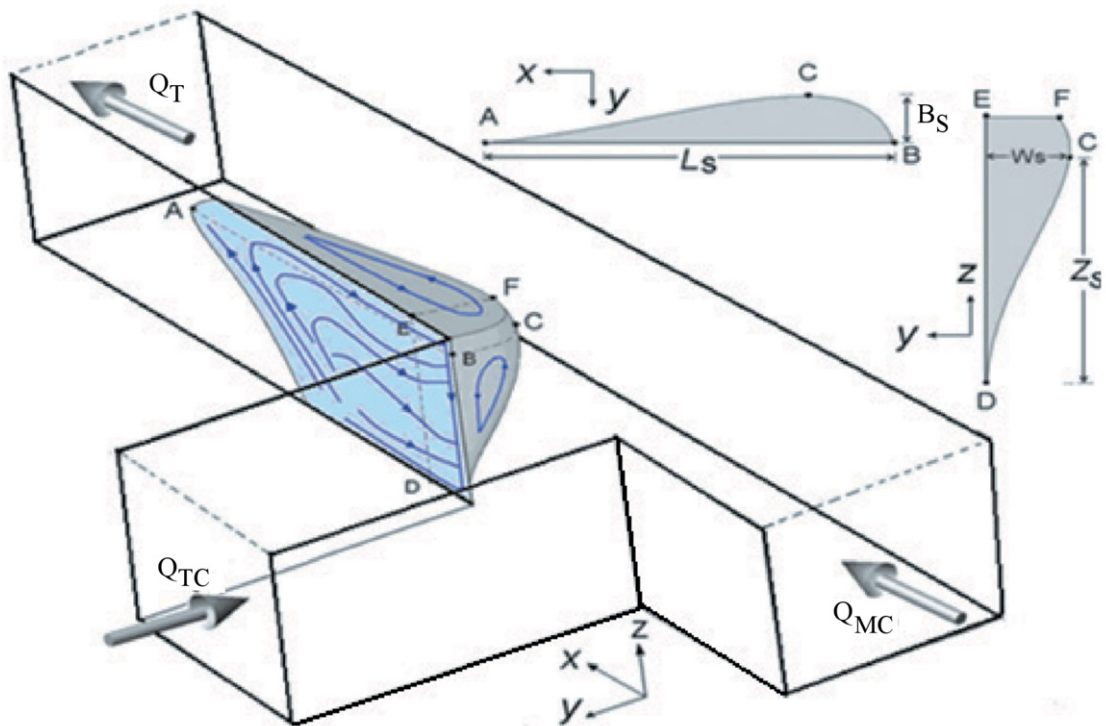


Figura 2.3: Modelo conceitual da zona de separação em confluências fluviais. Adaptado de (Shakibainia et al., 2010).

1987). Um efeito semelhante acontece se o Q_r for fixo, a zona de separação do escoamento vai aumentar em largura com o aumento do ângulo de confluência. Este efeito é causado pela mudança da geometria do canal a jusante do vértice do TC ser mais significativa. Assim uma das consequências do aumento da largura da zona de separação é a limitação da área efetiva do escoamento do MC (definida por B_c na Figura 2.1) (Best, 1987).

A altura mínima da superfície livre ocorre no início da zona de separação (Biron et al., 2002; Shakibainia et al., 2010). Esta altura mínima diminui com a diminuição do Q_r e com o aumento do ângulo de confluência, que faz com que exista um aumento da deflexão do escoamento (Huang et al., 2002). Quando o ângulo de confluência é pequeno a diferença entre a altura máxima e mínima do escoamento é pequena.

Como foi referido anteriormente à medida que o ângulo da confluência aumenta, a zona de separação vai aumentar. Esta relação nem sempre se verifica, uma vez que para ângulos superiores a 90° as condições são completamente diferentes, pois o escoamento do TC entra no MC com a direção oposta. Assim, como as misturas do escoamento vão ocorrer numa distância menor e a penetração do escoamento do TC no MC vai ser menor, então também a zona de separação vai

ser inferior (Shakibainia et al., 2010). Um exemplo deste tipo de escoamento, com o ângulo de 105° , pode ser encontrado em Best (1987). Neste estudo verificou-se que para um Q_r pequeno a zona de separação é mais pequena do que para ângulos de 70° ou 90° . Este fenómeno é causado pelos efeitos da perda de quantidade de movimento do escoamento do TC. Por esta razão, ângulos inferiores a 45° causam menor penetração do escoamento do TC no MC, que resulta numa zona de separação pequena. É de realçar que em alguns casos a zona de separação é inexistente (Shakibainia et al., 2010). Como por exemplo, para um ângulo de 15° , além da zona de separação ser menor, o escoamento não vai ser muito suscetível à variação de Q_r (Best, 1987; Best e Reid, 1984; Roy e Bergeron, 1990).

Visto que a zona de separação do escoamento é caracterizada por velocidades reduzidas, é nesta zona que a maior parte dos sedimentos vai ser depositada. A grande parte dos sedimentos que se depositam nesta zona provêm do TC. Devido a esta concentração de sedimentos forma-se normalmente uma zona em que o leito do MC vai estar mais próximo da superfície livre (Best, 1987; Best, 1988; Best e Reid, 1984; Mosley, 1976). Para pequeno Q_T a região onde existe deposição de sedimentos pode ficar exposta e o escoamento é obrigado a contorna-la. Desta forma, a região de separação do escoamento é caracterizada por velocidades médias pequenas com vetores orientados para montante (Rhoads e Kenworthy, 1995). Pelo contrário, quando o Q_T é elevado, a região onde existe deposição de sedimentos fica totalmente submersa, o que faz com que a zona de separação de escoamentos seja menos significativa e, conseqüentemente, os vetores de velocidade média vão ser praticamente paralelos ao longo do MC (Rhoads e Kenworthy, 1995).

Na zona de separação pode também existir uma célula helicoidal com eixo rotacional na direção do escoamento formada pelas tensões presentes no interior da zona de separação (Shakibainia et al., 2010). Na Figura 2.4 estão representadas algumas células helicoidais presentes no escoamento. Estas células têm tendência a dissipar devido à deposição de sedimentos. Mas quando o ângulo de confluência for 90° e não existirem muitos sedimentos (condição experimental ou de modelo numérico), as células estão bem evidenciadas (Figura 2.4b). Quando o ângulo de confluência for 45° , apesar da célula estar presente, é muito mais fraca (Figura 2.4a).

Nesta revisão bibliográfica mostrou-se que a zona de separação tem um papel fundamental no transporte de sedimentos, na sua deposição, na erosão do canal, nas mudanças da morfologia do leito e na mudança da superfície livre. Portanto, pode-se afirmar que é a zona com maior importância no estudo das confluências.

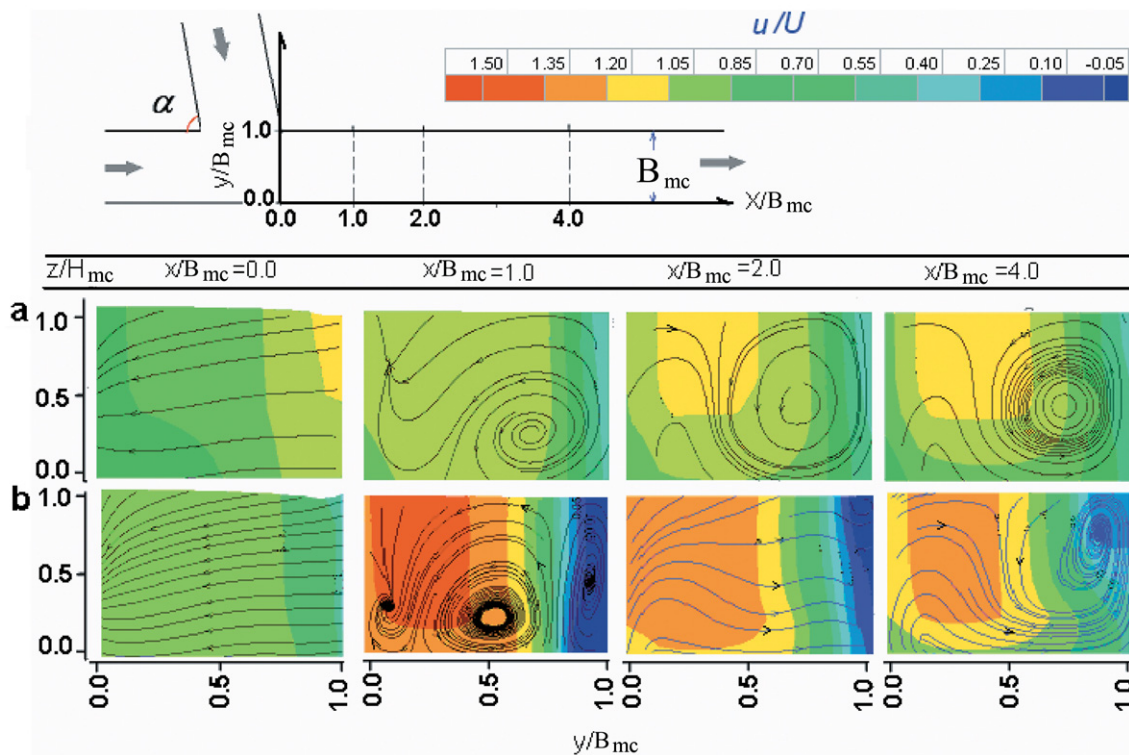


Figura 2.4: Secção transversal do MC mostrando o padrão do escoamento e as correntes secundárias nas confluências para $Q_r = 0.5$ e com dois ângulos de confluência (α) diferentes: a) $\alpha = 45^\circ$; b) $\alpha = 90^\circ$. Onde u é a componente da velocidade na direcção longitudinal e U é a velocidade média do escoamento. Adaptada de (Shakibainia et al., 2010).

2.1.4 Zona de velocidade máxima do escoamento

A zona de velocidade máxima forma-se entre a margem oposta do TC e a zona de separação do escoamento. Como o nome indica, esta zona é caracterizada por elevadas velocidades de escoamento. A sua formação deve-se ao efeito de contração do escoamento provocado pelo aumento da largura da zona de separação (Best, 1987; Biron et al., 1996b; Shakibainia et al., 2010). Portanto, a zona de velocidade máxima está diretamente ligada à zona de separação do escoamento.

Como referido anteriormente, para elevado Q_r , a largura da zona de separação vai ser menor, o que faz com que a zona de velocidade máxima seja menos estreita e, conseqüentemente a velocidade máxima relativa vai diminuir (Best, 1987; Shakibainia et al., 2010). Além do caudal, a velocidade máxima também sofre alterações com a variação do ângulo de confluência (α). À medida que o α aumenta, de 45° para 90° , como referido anteriormente, a zona de separação vai aumentar, o que faz com que a zona de velocidade máxima fique mais estreita e, conseqüentemente a velocidade máxima vai aumentar (Best, 1987; Shakibainia et al., 2010). Quando o α é pequeno a velocidade deixa de ser sensível à variação

do Q_r , uma vez que o escoamento do MC e do TC têm praticamente a mesma direção. Best e Reid (1984) mostraram que a velocidade máxima na confluência aumenta até 1.3 vezes à medida que o α aumenta de 15° para 90° . No escoamento em confluências é importante identificar a localização e magnitude da velocidade máxima porque é nesta zona que as tensões de corte atingem valores máximos. Portanto, é na zona de velocidade máxima onde pode ocorrer maior erosão dos canais (Shakibainia et al., 2010).

Segundo Shakibainia et al. (2010), na zona de velocidade máxima, pode existir uma célula helicoidal com o eixo de rotação alinhado com o escoamento. A formação desta célula deve-se ao contacto entre a célula presente na camada de corte e o escoamento do MC. Apresenta rotação contrária à célula da camada de corte. Semelhante à célula da zona de separação, também esta célula é evidente na confluência para $\alpha = 90^\circ$ (Figura 2.4b), mas quando o α é menor, a célula é eliminada (Figura 2.4a). Huang et al. (2002) faz referência a uma célula helicoidal, mas apenas nos dados experimentais, sendo que os resultados numéricos dos modelos RANS apresentam apenas algumas correntes secundárias.

2.1.5 Camada de mistura

A Camada de Mistura (MI) é gerada pelo contacto entre a zona de separação e a zona de velocidade máxima. Nesta camada estão presentes diversos vórtices (Best, 1987). A MI é formada pelas instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Esta camada é caracterizada por um aumento da intensidade de turbulência nas direções vertical e longitudinal, e pelos gradientes de velocidade verticais elevados (Biron et al., 1996a). As instabilidades de Kelvin-Helmholtz são causadas pela descontinuidade que existe na interface entre dois escoamentos com perfis de velocidade diferentes. Esta descontinuidade na velocidade tangencial faz com que exista vorticidade intensas na MI (Matsuoka, 2014).

Um exemplo da distribuição espacial da intensidade turbulenta para a componente da velocidade longitudinal é apresentada no Figura 2.5. Estas distribuições foram obtidas para três alturas diferentes de escoamento. Biron et al. (1996b) mostraram que a intensidade turbulenta em cada plano vertical é semelhante, existindo picos na MI. Estes picos são menos pronunciados junto ao leito, mas tornam-se cada vez mais intensos à medida que se aproxima da superfície. Uma vez que junto ao fundo os efeitos inerciais são inferiores aos efeitos viscosos. Além disso, os picos de turbulência mais intensos estão localizados próximos da zona de separação (Biron et al., 1996b).

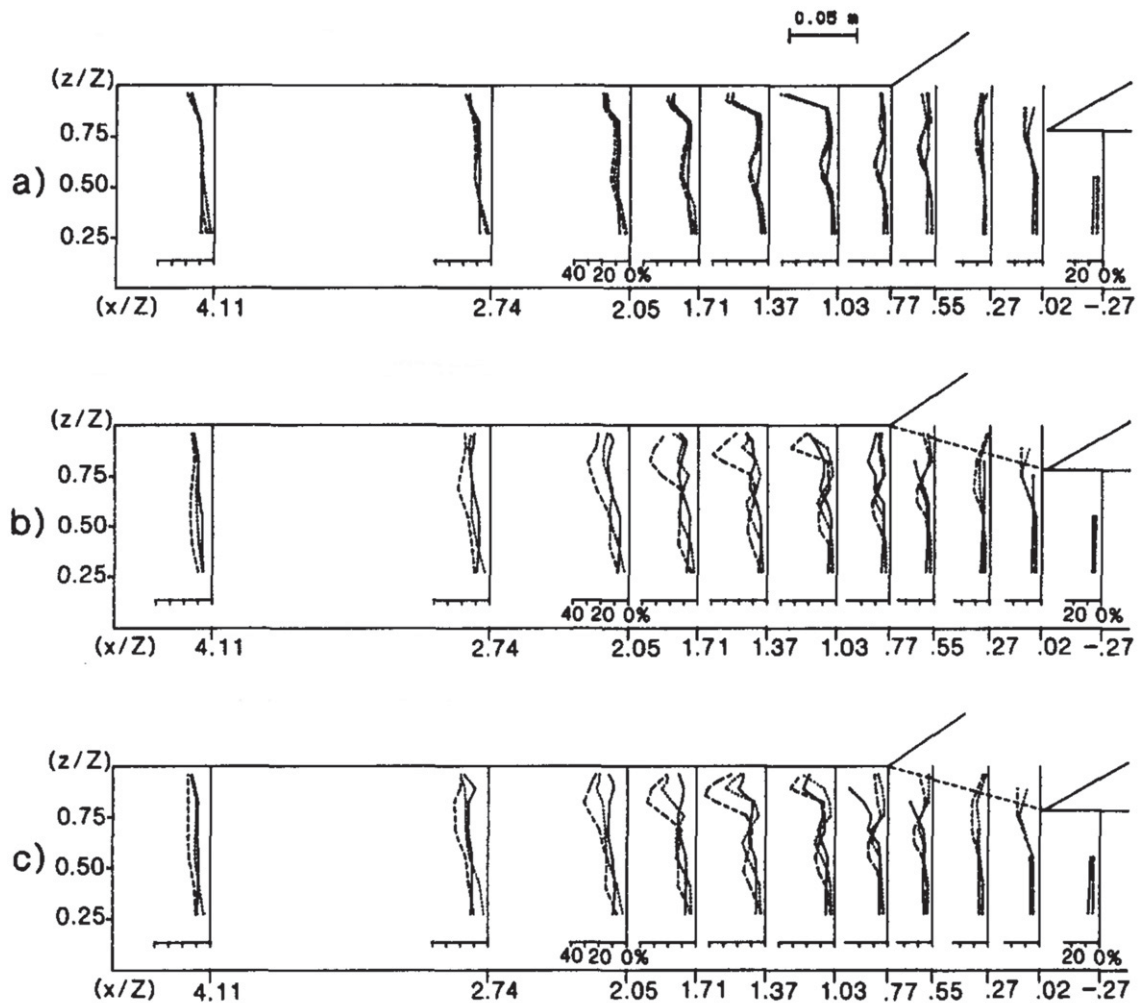


Figura 2.5: Intensidade turbulenta da componente de velocidade na direcção longitudinal em três alturas diferentes: $z/B_{MC} = 0.06$ (linhas contínuas), $z/B_{MC} = 0.38$ (linhas de pontos) e $z/B_{MC} = 0.81$ (linhas tracejadas): a) leitos concordantes; b) leitos discordantes com um degrau de 90° ; c) leitos discordantes com uma rampa de 45° . O sentido do escoamento é da direita para a esquerda. Adaptada de (Biron et al., 1996b).

A existência de discordância de leitos, como por exemplo degraus (Figura 2.5b) ou rampas (Figura 2.5c) entre o MC e o TC, altera o modo com que a intensidade turbulenta distribui-se na MI. Na presença de leitos discordantes, existe um aumento na intensidade turbulenta junto ao leito do MC, associado à geração de turbulência junto ao leito do degrau. Observa-se também, na Figura 2.5, que em contraste aos leitos concordantes, a localização dos picos de intensidade turbulenta associados à MI não são coincidentes entre o leito e a superfície livre. Mostrando, a existência de deformação na MI próxima ao TC (Biron et al., 1996b). Assim, o eixo vertical da MI é aproximadamente perpendicular ao leito do MC. No entanto, na presença de leitos discordantes, o eixo é inclinado para o TC (Biron

et al., 1996a). Portanto, a discordância de leitos faz com que exista uma distorção na MI, que conseqüentemente promove a circulação secundária e aumenta a mistura dos escoamentos. Apesar de apenas ser significativa para pequenos raios de profundidade e para raios de velocidade maiores que 1.0. O raio de profundidade é definido por $H_r = H_{TC} / H_{MC}$ e o raio de velocidade média é definido por $V_r = V_{TC} / V_{MC}$, onde o V_{TC} e o V_{MC} dizem respeito à velocidade média do TC e do MC, respectivamente (Bradbrook et al., 1998).

Tal como na zona de separação e na zona de velocidade máxima, na MI em alguns casos, pode existir uma célula helicoidal com o eixo de rotação na direção do escoamento, designada de célula do TC (Shakibainia et al., 2010). A formação desta célula deve-se à deflexão do escoamento do TC e é normalmente a célula mais forte na confluência. Esta deflexão do escoamento causa um gradiente radial de pressão que resulta em correntes secundárias em direção à margem oposta e à margem próxima do TC, junto da superfície livre e junto ao leito, respectivamente. Este processo continua a jusante e dissipa-se gradualmente. Assim como as outras células, quando $\alpha = 90^\circ$ esta célula é muito evidente (Figura 2.4b), mas quando α diminuí, esta célula é mais fraca e dissipa-se numa curta distância (Figura 2.4a). Portanto a MI também vai ser menor (Best, 1988; Bradbrook et al., 1998; Mosley, 1976).

A MI também é caracterizada pela existência de uma zona de erosão (Mosley, 1976). A profundidade da zona de erosão aumenta com a diminuição do Q_r e com o aumento de α , o que provoca um aumento na deflexão do escoamento (Best, 1987; Best, 1988; Mosley, 1976). Assim, devido a esta deflexão são criados vórtices verticais, que em conjunto com o aumento da velocidade do escoamento, são responsáveis pela erosão do leito do MC.

Segundo Rhoads e Kenworthy (1995), quando $Q_r < 1.0$ o escoamento do TC vai ter maior influência no escoamento do MC que se encontra mais próximo da superfície, existindo velocidades mais elevadas. Pelo contrário, quando $Q_r > 1.0$ o escoamento do TC vai influenciar o escoamento do MC junto ao leito, com velocidades inferiores.

2.1.6 Zona de recuperação do escoamento

A zona de recuperação do escoamento começa a jusante da zona de separação do escoamento (Best, 1987). Nesta zona o escoamento recupera gradualmente da influência da dinâmica da confluência, os escoamentos do TC e do MC misturam-se gradualmente através da MI e a intensidade turbulenta diminuí.

A zona de recuperação do escoamento é caracterizada pela redução dos efeitos

da presença da confluência, isto é, pela redução das velocidades transversais e verticais. Nesta zona a largura efectiva do escoamento volta a ser igual à largura do MC. A diminuição dos efeitos faz com que o escoamento retome a sua simetria, com correntes paralelas às paredes do MC. Analogamente, a zona de recuperação do escoamento sofre mudanças devido ao ângulo da confluência. Isto é, à medida que o ângulo de confluência aumenta, o escoamento vai necessitar de uma maior distância a jusante para recuperar completamente (Huang et al., 2002).

2.2 Estudo experimental do escoamento em confluências

Especialmente em rios naturais as condições e as variáveis de entrada são difíceis de prever e quantificar. Uma vez que, estão sempre em constante mudança. O caudal não é constante e a própria morfologia do leito está sempre a variar (Rhoads e Kenworthy, 1995). Para estudar as características desses escoamentos, vários investigadores realizaram ensaios laboratoriais de modo a reproduzir os parâmetros presentes nas confluências naturais (Best, 1987; Mosley, 1976; Roy e Bergeron, 1990). Mesmo assim, existiu sempre alguma controvérsia sobre os resultados obtidos experimentalmente, uma vez que algumas conclusões retiradas desses trabalhos não reproduziam os fenómenos verificados em confluências naturais (Rhoads e Kenworthy, 1995). Existe assim, dificuldades em criar um modelo conceptual da estrutura de escoamento em confluências naturais (Stephen Rice e Rhoads, 2008). Esta dificuldade pode ser associada às várias características do escoamento em confluências e também às condições de fronteira. Se a montante de uma confluência natural existir curvatura no MC, o desenvolvimento do escoamento na confluência pode ser influenciado. No entanto, a maior parte dos estudos laboratoriais usam canais retilíneos e horizontais a montante da confluência, o que elimina a possibilidade de existência de curvatura do escoamento do MC na confluência. Por esta razão não é surpreendente que estudos semelhantes subestimem a sua importância (Stephen Rice e Rhoads, 2008). Assim, é de grande importância reconhecer a influência que a morfologia do canal a montante pode ter no desenvolvimento do escoamento. Existe diferença entre os estudos experimentais que usam canais retangulares (Best e Roy, 1991; Weber et al., 2001), e os estudos laboratoriais (com canais não retangulares) ou de confluências naturais (Best, 1987; Best, 1988; Mosley, 1976).

À medida que o rácio entre a largura e a profundidade aumenta, a topografia e a morfologia dos canais tornam-se mais dominantes, podendo causar desvios

em relação aos modelos de confluências que consideram apenas os gradientes de pressão no leito causados pela recirculação. Estas diferenças têm importância no desenvolvimento do escoamento na zona da confluência e afetam a taxa a que os padrões de escoamento ajustam-se à influência da morfologia do canal a montante. Devido ao efeito que as estruturas de escoamento têm no transporte de sedimentos e nas mudanças morfológicas, esta diferença na morfologia a montante da confluência pode alterar o modo como os sedimentos se depositam (Stephen Rice e Rhoads, 2008).

Apesar das investigações sobre confluências terem-se tornado mais sofisticadas, permitindo a identificação de algumas variáveis importantes que controlam a dinâmica da confluência, ainda não é fácil prever as características instantâneas do escoamento em ensaios laboratoriais e em confluências naturais. Por exemplo, apesar de ser possível visualizar as correntes secundárias em canais laboratoriais pequenos, as medições detalhadas dos campos de velocidade necessárias para estudar intensivamente esse fenómeno não são simples de realizar (Ashmore et al., 1992). Por outro lado, nas confluências naturais os valores dos caudais não são constantes e bem determinados, a sua estimação é feita multiplicando-se a velocidade média medida numa secção transversal do MC a montante da confluência, pela área do canal nessa secção (Roy e Bergeron, 1990). Contudo, existem erros na previsão da área efectiva do canal. Não obstante, a compreensão dos processos e da dinâmica das confluências baseia-se maioritariamente em ensaios laboratoriais (Best, 1988; Best e Roy, 1991; Mosley, 1976). Como as confluências naturais têm normalmente dezenas de metros de largura (Bradbrook et al., 1998; Lane et al., 2000; Rhoads e Sukhodolov, 2004), estes estudos focam-se maioritariamente em confluências de pequena escala (Stephen Rice e Rhoads, 2008).

Desta forma, pode-se afirmar que tanto os ensaios laboratoriais como os ensaios de campo têm limitações que normalmente dificultam a comparação de resultados, perturbando a determinação das variáveis dominantes da confluência (Stephen Rice e Rhoads, 2008). Portanto, a modelação numérica constitui uma boa ferramenta de auxílio.

2.3 Estudo numérico do escoamento em confluências

A modelação numérica do escoamento em confluências pode ser realizada por diversos modelos numéricos. Em grande parte dos estudos é realizada usando as equações RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) baseadas na discretização dos

volumes finitos (Biron et al., 2004; Bradbrook et al., 1998; Bradbrook et al., 2000a; Bradbrook et al., 2001; Bradbrook et al., 2000b; Huang et al., 2002; Lane et al., 2000; Lane et al., 1999; Stephen Rice e Rhoads, 2008). Inicialmente os estudos numéricos de confluências foram realizados em modelos 2D. Contudo, Lane et al. (1999) mostraram que a capacidade para prever os aspectos importantes das confluências em 3D é muito maior do que em 2D.

Para resolver as equações RANS em condições de escoamento médio estacionário é necessário um modelo de turbulência. Os modelos de turbulência normalmente usados são o $k - \varepsilon$ normalizado (Huang et al., 2002) ou o modelo $k - \varepsilon$ modificado (RNG). O modelo $k - \varepsilon$ modificado apresenta melhor desempenho em situações onde ocorre separação do escoamento (Biron et al., 2004; Bradbrook et al., 1998; Bradbrook et al., 2000a; Bradbrook et al., 2001; Lane et al., 2000; Stephen Rice e Rhoads, 2008). Contudo, as RANS têm algumas limitações relacionadas com a precisão dos resultados, uma vez que encontram-se apoiadas nos modelos de turbulência. Estes modelos não são adequados para estudar intensivamente estruturas turbulentas anisotrópicas. Porém, para confluências onde o objetivo é investigar as medidas de controlo de inundação em vez dos processos de mistura detalhada o modelo RANS é uma escolha acertada, pois exige um trabalho computacional menos intensivo (Stephen Rice e Rhoads, 2008).

Outro modelo usado para simular escoamentos turbulentos é o DNS (Direct Numerical Simulation). Contrariamente ao modelo RANS, o DNS resolve diretamente as equações de Navier-Stokes usando uma malha muito fina. Portanto o DNS permite resolver todas as escalas turbulentas, uma vez que neste modelo não existe nenhum tipo de modelação da turbulência. Mas em contraste, vai exigir um esforço computacional muito elevado. Além disso, o DNS também tem limitações relativas à geometria e ao tipo de escoamentos, uma vez que atualmente só pode ser aplicado em escoamentos com geometrias simples (Zhiyin, 2015).

Uma forma intermédia para simular os efeitos turbulentos é usar o modelo LES. Neste modelo as flutuações do escoamento maiores que a dimensão da malha local são calculadas diretamente e um modelo de turbulência de sub-malha é usado para calcular as flutuações com escalas menores que a escala da malha (Stephen Rice e Rhoads, 2008; Zhiyin, 2015). Assim, este modelo é mais preciso que o modelo RANS e não tem tantas limitações relativas à geometria como as apresentadas pelo modelo DNS. O modelo LES também simula, com boa precisão, escoamentos com gradientes de pressão adversos (Constantinescu et al., 2007; Zhiyin, 2015). Bradbrook et al. (2000b) usou com sucesso o LES para estudar confluências com leitos discordantes, tanto naturais como laboratoriais, obtendo resultados importantes sobre o papel que as instabilidades turbulentas têm no

escoamento em confluências.

Assim, os estudos envolvendo modelação numérica tridimensional forneceram conhecimento muito importante sobre as estruturas do escoamento em confluências. A modelação numérica não só permite que sejam testados uma grande variedade de cenários, mas também fornece explicações físicas que de outra forma seriam difíceis de obter (Stephen Rice e Rhoads, 2008).

MÉTODO NUMÉRICO

Neste capítulo apresenta-se inicialmente o código numérico, onde é descrito o *software* OpenFOAM e o *solver* usado. Seguidamente descreve-se o modelo LES. Por fim, apresenta-se o domínio computacional, onde se descreve a malha, as condições de fronteira e os parâmetros numéricos usados.

3.1 Código numérico

Nesta dissertação a modelação numérica do escoamento é feita usando o *software* OpenFOAM. Este *software* resolve as equações de Navier-Stokes recorrendo a vários *solvers*. O *solver* usado neste trabalho é o *pisoFoam* e o modelo usado é o LES. As equações de Navier-Stokes para fluidos newtonianos incompressíveis escrevem-se, utilizando a notação de Einstein, da seguinte forma (White, 2011):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(2\nu S_{ij})}{\partial x_j} + g_i \quad (3.1)$$

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

3.1.1 OpenFOAM

O OpenFOAM (Open source Field Operation and Manipulation) é um *software* de código aberto que permite resolver problemas da mecânica do meio contínuo, incluindo a dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Este *software* encontra-se dividido em duas categorias: *solvers* e *utilities*. Os *solvers* adaptam-se de modo

a resolver um problema específico e os *utilities* realizam tarefas de pré e pós-tratamento de dados como por exemplo: criação de malha, extração de resultados e manipulação de dados. O OpenFOAM não contém interface gráfica e, portanto, encontra-se organizado num conjunto de bibliotecas em linguagem C++.

Para realizar uma simulação numérica é necessário criar uma diretoria (caso de estudo), esta diretoria é composta por 3 subdiretorias "0", "constant" e "system". A diretoria "0" contém as informações sobre as condições de fronteira iniciais do domínio computacional. A diretoria "constant" contém informação sobre as propriedades do fluido e sobre os modelos de turbulência e contém ainda uma subdiretoria "polyMesh" onde encontra-se a informação sobre a malha. Por fim, a diretoria "system" contém a informação sobre os parâmetros da simulação e os algoritmos de resolução. No anexo I (Figura I.1) apresenta-se um diagrama em árvore da estrutura da simulação realizada no OpenFOAM v1706.

3.1.2 Solver pisoFoam

O *solver pisoFoam* baseia-se no algoritmo PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) para simular escoamentos incompressíveis e turbulentos. O algoritmo PISO é um procedimento de cálculo pressão-velocidade em regime transiente. O algoritmo PISO pode ser visto como uma extensão do algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Uma vez que em cada passo de tempo o algoritmo PISO resolve as equações de Navier-Stokes calculadas pelo algoritmo SIMPLE de forma a obter o campo de pressão e de velocidades, e depois aplica dois passos de correção que melhoram a aproximação dada pela resolução das equações de Navier-Stokes. Enquanto que no algoritmo SIMPLE só existe um passo de correção. Assim, como o algoritmo PISO resolve a equação da correção da pressão duas vezes o *solver* vai necessitar de mais capacidade de armazenamento em memória, aumentando assim o esforço computacional requerido. Contudo, este algoritmo continua a ser eficiente e rápido (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Nesta dissertação, o algoritmo PISO assume que os resultados são convergentes se os desequilíbrios globais forem inferiores a 0.01% e, se os dois critérios de convergência forem cumpridos. Isto é, se o valor residual de 10^{-6} não for ultrapassado e se o comportamento da raiz dos valores quadráticos médios (RMS) for assintótico. No *pisoFoam*, a modelação da turbulência pode ser feita usando o modelo RANS ou o modelo LES.

De acordo com estudos anteriores, especificamente o estudo de Bradbrook et al. (2000b), o modelo LES mostrou-se adequado para simular com precisão o

escoamento na zona de separação e na MI, mantendo os custos computacionais limitados. O modelo LES resolve as escalas de maior dimensão (que contêm a maior parte da energia turbulenta, sendo assim responsáveis por grande parte da transferência de energia) e modela as escalas inferiores às da dimensão da malha, garantindo uma boa precisão dos resultados (Constantinescu et al., 2007; Zhiyin, 2015).

3.2 Equações fundamentais do modelo LES

No modelo LES qualquer variável do escoamento, como por exemplo, $\phi(\vec{x}, t)$ é decomposta numa parte resolvida ou da escala da malha, $\tilde{\phi}(\vec{x}, t)$, e numa parte modelada ou da SGS (escala da sub-malha), $\phi'(\vec{x}, t)$:

$$\phi(\vec{x}, t) = \tilde{\phi}(\vec{x}, t) + \phi'(\vec{x}, t) \quad (3.3)$$

e

$$\tilde{\phi}(\vec{x}, t) = \int \phi(\vec{x}, t) G(\vec{x} - \vec{y}) d\vec{y} \quad (3.4)$$

onde G representa a operação de filtro. Aplicando a função filtro (de modo a reduzir a quantidade de escalas espaciais a serem resolvidas), as equações de Navier-Stokes (Equações (3.1) e (3.2)) (Brito et al., 2017; Germano et al., 1991) vêm:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (2\nu \tilde{S}_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + g_i \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.6)$$

onde \tilde{u}_i são as componentes resolvidas do campo de velocidades e \tilde{p} é a pressão resolvida. O termo $\tilde{\tau}_{ij} = \tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j$ é o tensor das tensões de corte da SGS. Este termo descreve o efeito causado nas escalas resolvidas do movimento pelas SGS. Neste estudo, como as pequenas escalas são mais isotrópicas que as escalas maiores (Germano et al., 1991), o tensor das tensões da SGS é modelado assumindo-se que existe um equilíbrio local entre a produção e dissipação da energia cinética da SGS. Portanto é possível usar-se a hipótese da viscosidade turbulenta (Brito et al., 2017). A parte anisotrópica do tensor $\tilde{\tau}_{ij}$ é dada por:

$$\tilde{\tau}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tilde{\tau}_{kk} = -2\nu_t \tilde{S}_{ij} \quad (3.7)$$

onde δ_{ij} é o delta de Kronecker, ν_t é a viscosidade turbulenta e \widetilde{S}_{ij} é o tensor resolvido da taxa de deformação definido por (Bradbrook et al., 2000b):

$$\widetilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \widetilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \widetilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.8)$$

A ν_t é modelada da seguinte forma:

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 |\widetilde{S}_{ij}| \quad (3.9)$$

onde $|\widetilde{S}_{ij}| = \sqrt{2\widetilde{S}_{ij}\widetilde{S}_{ij}}$ é a norma do tensor resolvido da taxa de deformação, $\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3}$ é o filtro da SGS correspondente à escala local da malha e C_s é a constante de Smagorinsky, que pode assumir diversos valores ao longo do escoamento. Para a turbulência isotrópica a constante C_s relaciona-se com a constante de Kolmogorov (C_k) da seguinte forma: $C_s \approx \frac{1}{\pi} (\frac{2}{3C_k})^{3/4}$. No entanto, este valor é demasiado dissipativo e prevê incorretamente o comportamento assintótico próximo das superfícies sólidas e em zonas laminares (Constantinescu et al., 2007). Portanto, para ultrapassar esta limitação, usa-se o modelo dinâmico de Smagorinsky. Este modelo foi inicialmente desenvolvido por Germano et al. (1991) com o objetivo de corrigir a dissipação excessiva do modelo de Smagorinsky, apresentando um comportamento assintótico correto próximo das superfícies sólidas e em zonas laminares. Portanto, o quadrado da constante C_s^2 é substituído pelo coeficiente dinâmico C_d , que é calculado dinamicamente dependendo da estrutura local do escoamento. Para calcular o C_d é introduzido um filtro de teste simbolizado pela barra no topo dos argumentos, este filtro é aplicado numa largura maior que a largura da malha (Germano et al., 1991). O coeficiente dinâmico é calculado da seguinte forma:

$$C_d = -\frac{1}{2} \frac{[(L_{ij} - L_{kk}\delta_{ij}/3)M_{ij}]}{M_{ij}M_{ij}} \quad (3.10)$$

onde

$$L_{ij} = \overline{\widetilde{u}_i \widetilde{u}_j} - \overline{\widetilde{u}_i} \overline{\widetilde{u}_j} \quad (3.11)$$

e

$$M_{ij} = \overline{\Delta^2} (|\widetilde{S}_{ij}| \overline{\widetilde{S}_{ij}} - \overline{|\widetilde{S}_{ij}| \widetilde{S}_{ij}}) \quad (3.12)$$

Nas Equações (3.10), (3.11) e (3.12), o til representa a operação de filtragem com largura de filtro de tamanho Δ . A operação de filtragem representada pelo til é comparável com o tamanho da malha do modelo LES, enquanto que a barra no topo dos argumentos representa a operação de filtragem numa escala 2Δ (Brito et al., 2017).

O coeficiente dinâmico C_d é uma quantidade local e instantânea e, pode variar no espaço e no tempo. Apesar disso, se C_d for negativo, pode existir instabilidade numérica. Consequentemente, o numerador e denominador da Equação (3.10) são médias na direção homogénea e, os valores negativos de ν_t tomam o valor de zero se a viscosidade total, $\nu + \nu_t$, for negativa. O filtro de teste usado no modelo dinâmico é um filtro discreto simétrico baseado na regra trapezoidal, onde uma função f no instante i é dada por:

$$\bar{f}_i = \frac{1}{4}(f_{i-1} + 2f_i + f_{i+1}) \quad (3.13)$$

Este filtro aplica-se sequencialmente a cada direção.

3.3 Domínio computacional

3.3.1 Descrição da malha

A geometria do domínio computacional foi definida de acordo com a geometria dos ensaios laboratoriais realizados por (Birjukova et al., 2014). Na Figura 3.1 apresenta-se o esquema do domínio computacional utilizado neste estudo.

Este domínio computacional tem 1 m de largura e 3 m de comprimento e foi discretizado usando-se uma malha estruturada com elementos hexaédricos. O domínio foi discretizado usando o procedimento presente em Bradbrook et al. (1998). Neste procedimento, inicialmente é usada uma malha grosseira. Seguidamente, faz-se a redução do tamanho dos elementos até obter-se resultados semelhantes a malha mais fina. O espaçamento da malha foi mais refinado onde se previa maiores gradientes de velocidade. Isto é próximo às superfícies sólidas, na zona da superfície livre, nas zonas de estagnação, de deflexão e de separação do escoamento (Biron et al., 2004; Bradbrook et al., 2000a; Brito et al., 2017).

O número de elementos no MC é aproximadamente $830 \times 330 \times 40$ para as direções longitudinal, transversal e vertical respetivamente. O total de elementos é de aproximadamente 10.956.000.

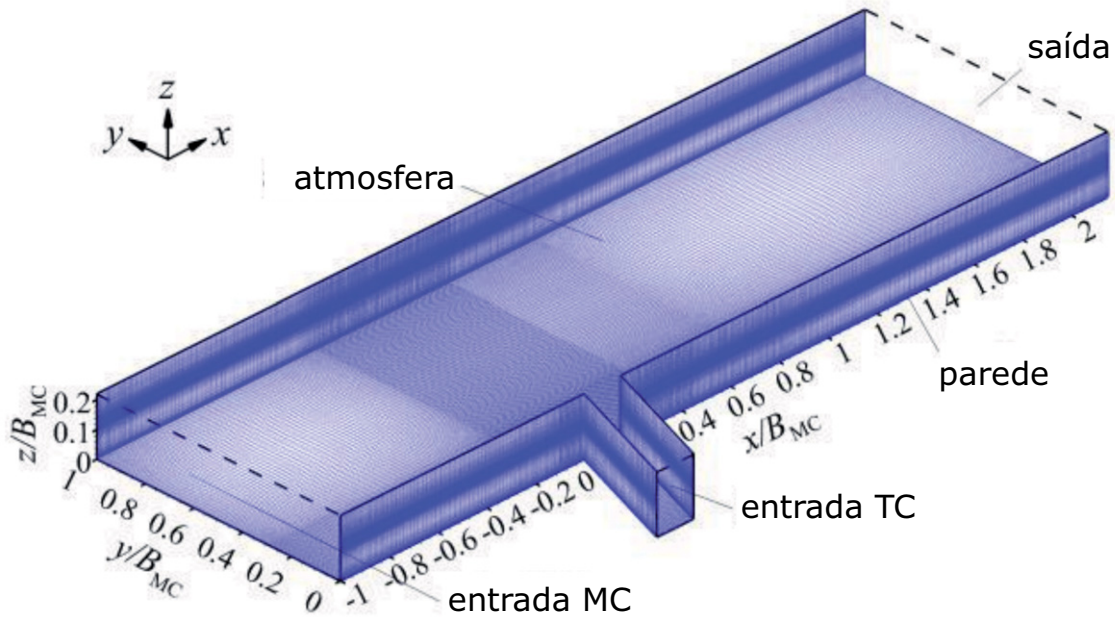


Figura 3.1: Domínio computacional, malha e condições de fronteira.

3.3.2 Condições de fronteira

Nas fronteiras de entrada (entrada do MC e do TC apresentadas na Figura 3.1) foram aplicadas as condições dos ensaios experimentais, isto é, as velocidades médias medidas experimentalmente nas secções transversais do MC e do TC foram impostas como condições de fronteira. Nas superfícies sólidas foi estabelecida a condição de não escorregamento e para a modelação da turbulência no leito do MC foi usada a lei da parede, dada por: $u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + A$, onde $u^+ = \frac{U}{U^*}$, $\kappa \approx 0.4$ é a constante universal de Von Karman, A é uma constante empírica que varia entre ≈ 5.0 e ≈ 5.3 , U é a velocidade média do escoamento e U^* é a velocidade de atrito (Hoohlo, 1994; White, 2011). Os valores da coordenada vertical adimensional (z^+) do elemento mais próximo do leito do canal foram mantidos em torno de 30. Na fronteira de saída impôs-se uma condição de pressão hidrostática com valor fixo. Para garantir que todas as variáveis tivessem gradientes pequenos, a fronteira de saída ficou definida afastada da zona de separação onde o escoamento encontra-se com pequenos gradientes longitudinais, isto é, na zona de recuperação.

Como a elevação e depressão da superfície livre são características da dinâmica do escoamento em confluências, o modelo numérico necessita de um tratamento com superfície livre (Weerakoon, 1989). Apesar disso, definir os contornos exactos da superfície é muito dispendioso computacionalmente e a maior parte dos estudos anteriores usaram a hipótese da "superfície rígida". Nesta condição a superfície livre é substituída por um plano fixo. Assim, na superfície livre, todas

as derivadas normais e velocidades são zero. Contudo, a pressão nessa superfície não é definida como zero. Isto é, uma pressão maior que zero representa uma elevação da superfície livre e uma pressão inferior a zero representa uma depressão. Nesta simplificação a variação na posição da superfície livre é apenas acessível em termos do gradiente de pressão das equações de Navier-Stokes. O que implica previsões de velocidade mais elevadas do que o suposto, em locais onde ocorreria elevação da superfície livre (Bradbrook et al., 1998). O contrário acontece em zonas onde ocorreria depressão. Esta simplificação da condição de superfície livre deve-se à necessidade de diminuir o esforço computacional. Nesta dissertação esta simplificação também foi usada.

3.3.3 Parâmetros numéricos

Os caudais nas fronteiras, as propriedades do fluido e os parâmetros numéricos encontram-se representados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respetivamente.

Tabela 3.1: Caudais nas fronteiras e propriedades do fluido.

Parâmetro numérico	Simbologia	Valor	Unidades
Caudal do canal principal	Q_{MC}	0.044	m^3/s
Caudal do canal tributário	Q_{TC}	0.005	m^3/s
Massa volúmica do fluido	ρ	1000	Kg/m^3
Viscosidade do fluido	ν	1×10^{-6}	m^2/s

Tabela 3.2: Parâmetros numéricos usados no estudo numérico.

Parâmetro numérico	Simbologia	Valor	Unidades
Passo de tempo	Δt	10^{-4}	s
Passo de tempo mínimo	Δt_{min}	2×10^{-5}	s
Intervalo de escrita dos resultados	Δt_e	0.01	s
Número de Courant máximo	Co_{max}	0.25	-

VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Neste capítulo realiza-se a validação do modelo numérico. Inicialmente apresenta-se a instalação onde foram realizados os ensaios experimentais. Por último efetua-se a comparação entre os resultados numéricos e os dados experimentais de forma a validar o modelo numérico.

4.1 Instalação experimental

Os ensaios experimentais foram realizados numa confluência no Instituto Superior Técnico, por Birjukova et al. (2014). O MC é construído em betão e tem leito horizontal, com 12 m de comprimento, 1 m de largura e 0.5 m de profundidade. O TC é construído em PVC com 4.5 m de comprimento, 0.15 m de largura e 0.5 m de profundidade. O TC encontra-se ligado ao MC 5 m a jusante da entrada com um ângulo de 70°. Este ângulo permite representar as condições frequentemente observadas na natureza. Aumentou-se a rugosidade do fundo do MC com a adição de uma camada de gravilha com $d_{50} = 60$ mm e $\sigma_D = 2.5$, onde d_{50} é o tamanho médio dos sedimentos e σ_D é o coeficiente de rugosidade do grão. Esta condição permite garantir o desenvolvimento de um escoamento completamente turbulento nas zonas das medições. A Figura 4.1 mostra a região da confluência entre o MC e o TC com o carro de apoio à medição.

A água foi renovada com a ajuda de um reservatório de grandes dimensões e de uma bomba centrífuga. O caudal à entrada do MC foi medido por um caudalímetro ultrasónico com precisão de $\pm 2\%$. O caudal do TC foi medido através de

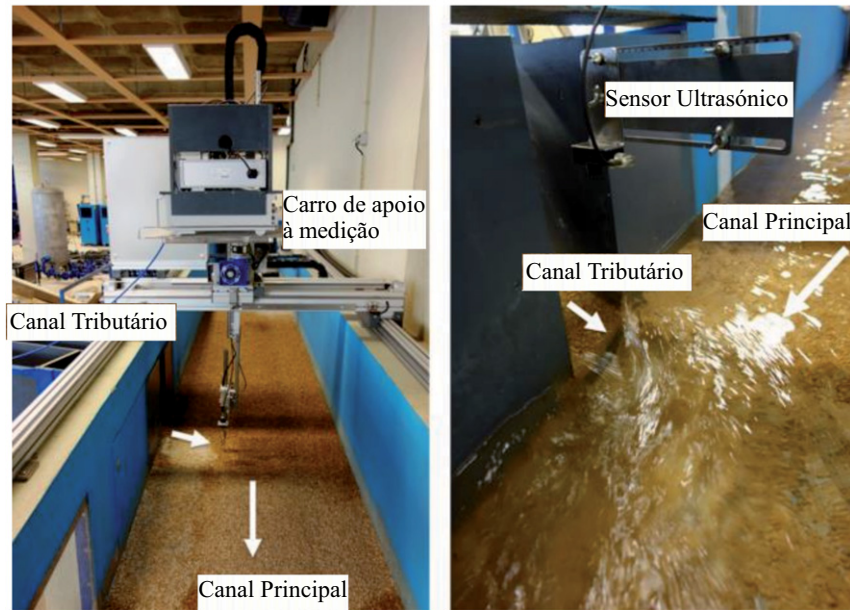


Figura 4.1: MC e TC com o carro de apoio à medição. As setas indicam as direcções do escoamento do TC e do MC.

um vertedor triangular com precisão de $\pm 5\%$. O rácio do caudal foi mantido constante, $Q_r = 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$ nos ensaios experimentais. A profundidade de escoamento no MC, H_{MC} , foi controlada a partir de uma comporta a jusante, permitindo um rácio de $B_{MC}/H_{MC} = 9.1$, onde B_{MC} é a largura do MC. Assim, a influência das paredes laterais no padrão de escoamento limita-se apenas a uma área pequena próxima às paredes laterais.

Na Figura 4.2 apresenta-se a malha experimental de medição (um total de 5678 pontos) e o sistema de coordenadas adotado.

A velocidade do escoamento no MC foi medida com um ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) de três componentes (Vectrino 10 MHz); com configuração de vista lateral. Um sistema de medida transversal automático de 3 eixos foi instalado no MC (com precisão de $\pm 0.1 \text{ mm}$), eliminando assim a necessidade de intervenção humana no posicionamento das sondas. A origem do sistema de coordenadas está situada no leito do canal no vértice a montante do TC (Figura 4.2).

Os valores das velocidades instantâneas foram obtidos em 19 secções transversais e em 334 perfis verticais. Em cada vertical foram medidos 17 pontos, sendo 11 pontos localizados aproximadamente em 30% da parte mais funda do escoamento. Estes 11 pontos mais próximos do leito encontram-se espaçados de 2 mm e os restantes 6 pontos encontram-se espaçados de 7 mm. A frequência de amostragem foi de 100 Hz e o tempo de aquisição para cada ponto foi de 90 segundos.

O mapeamento da superfície da água foi realizado por um sensor ultrasónico

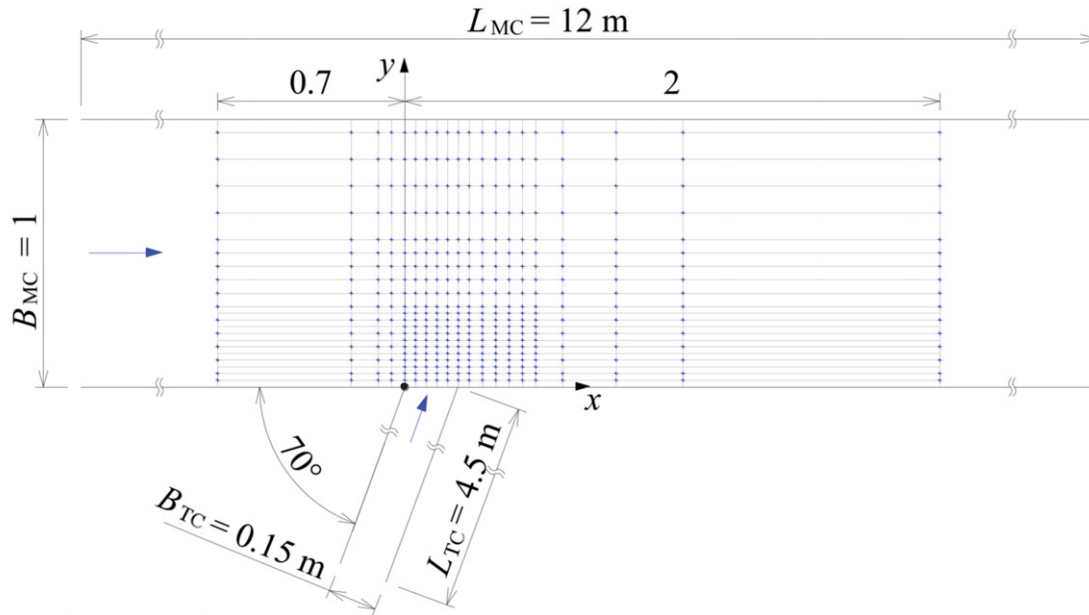


Figura 4.2: Vista de plano do esquema dos canais da confluência com a malha das medições.

(Figura 4.1, direita) com precisão de ± 0.3 mm. Com o controlo automático do carro de apoio à medição, foi possível medir a elevação da superfície livre com um espaçamento de 2 cm ao longo do eixo x , abrangendo completamente o alcance de medição da velocidade, definido com $-0.07 \leq x/B_{MC} \leq 2$. O espaçamento de medição ao longo do eixo y foi dividido em duas áreas. A primeira área próxima à parede do TC, $0.025 \leq y/B_{MC} \leq 0.30$, com espaçamento de 2.5 cm. A segunda área, $0.30 \leq y/B_{MC} \leq 0.85$, com espaçamento de 8.5 cm.

4.2 Comparação dos resultados numéricos e dados experimentais

Nesta secção pretende-se validar os resultados numéricos obtidos com o modelo LES. Esta validação é feita através da comparação das velocidades médias calculadas numericamente e das dadas experimentalmente. Os resultados numéricos e experimentais foram tratados com o apoio dos códigos desenvolvidos em Matlab apresentados nos anexos II, III, IV e V.

Nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam-se as magnitudes das velocidades médias adimensionais (\bar{U}_{xy}/U) calculadas da seguinte forma: $\bar{U}_{xy}/U = \sqrt{(\bar{u}/U)^2 + (\bar{v}/U)^2}$, para $z/H_{MC} = 0.18$, $z/H_{MC} = 0.48$ e $z/H_{MC} = 0.65$, respetivamente.

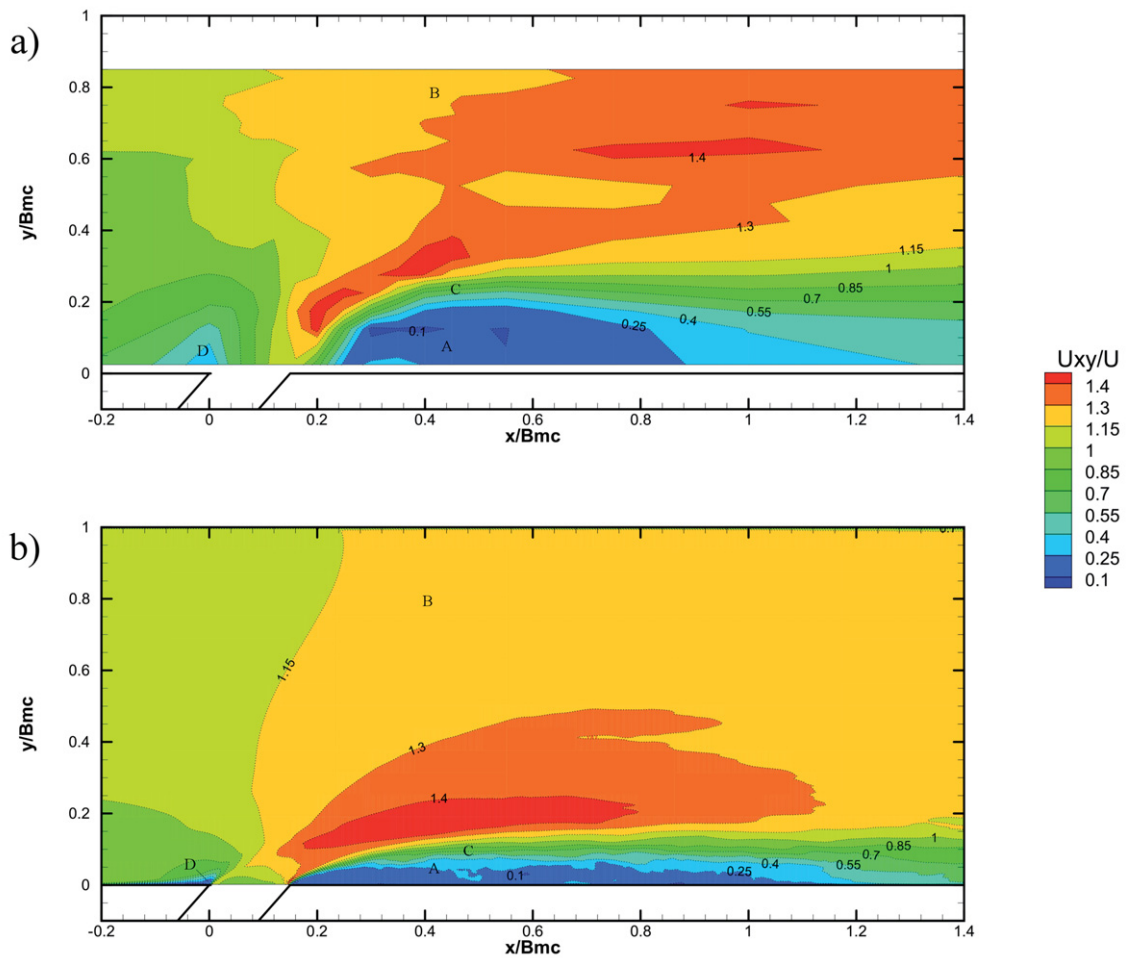


Figura 4.3: Magnitudes das velocidades médias adimensionais na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.18$: a) experimental; b) numérico.

De uma forma geral, os padrões das magnitudes das velocidades médias adimensionais numéricas são semelhantes aos dados experimentais. O modelo LES reproduz praticamente todos os padrões do escoamento nas zonas próximas da confluência. Identificam-se claramente: a zona de separação imediatamente a jusante do TC (identificada pela letra A na Figura 4.3), a zona de estagnação do escoamento imediatamente a montante do TC (representada pela letra D na Figura 4.3) e a zona de velocidade máxima (representada pela letra B na Figura 4.3). Como mencionado na Secção 2.1.1, a zona de estagnação do escoamento encontra-se próxima do vértice a montante do TC e é caracterizada pela redução na magnitude da velocidade do escoamento. Assim, como pode ser constatada nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, esta zona encontra-se bem identificada. Em ambos os resultados esta zona está localizada em $-0.1 < x/B_{MC} < 0$, para valores de $y/B_{MC} < 0.10$ e é caracterizada por $U_{xy}/U \approx 0$. Para facilitar a identificação da zona de estagnação, utiliza-se a Figura 4.6 que representa a componente longitudinal adimensional

4.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E DADOS EXPERIMENTAIS

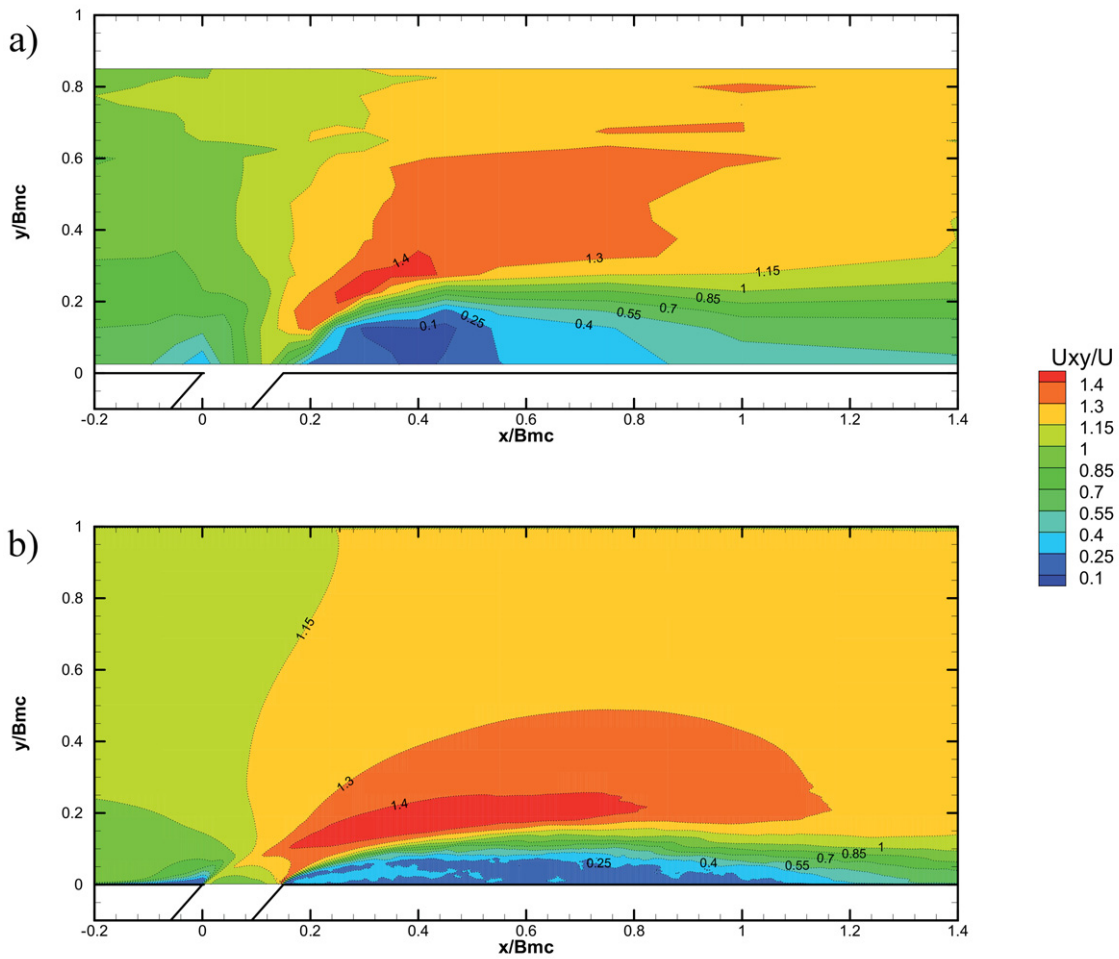


Figura 4.4: Magnitudes das velocidades médias adimensionais na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.48$: a) experimental; b) numérico.

da velocidade média (\bar{u}/U) na secção transversal $x/B_{MC} = 0$.

A análise conjunta das Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 permite identificar facilmente a zona de estagnação do escoamento (representada pela letra D nas Figuras 4.3 e 4.6). Esta zona é caracterizada por baixas velocidades próximas ao vértice do TC. Especialmente na Figura 4.6, pode-se identificar a recirculação nos resultados numéricos, uma vez que $\bar{u}/U \approx -0.2$. Contudo, nos resultados experimentais não é possível identificar a recirculação, uma vez que não existem medições próximas à parede (local onde ocorre recirculação nos resultados numéricos). A razão de não existirem estas medições deve-se às limitações existentes nas medições do ADV, que não consegue medir junto às paredes laterais.

Tanto nos resultados numéricos como nos resultados experimentais a zona de separação do escoamento encontra-se devidamente identificada. Contudo, os resultados numéricos prevêm uma zona com o comprimento superior e com a largura inferior aos resultados experimentais. Como mencionado na Secção 2.1.3,

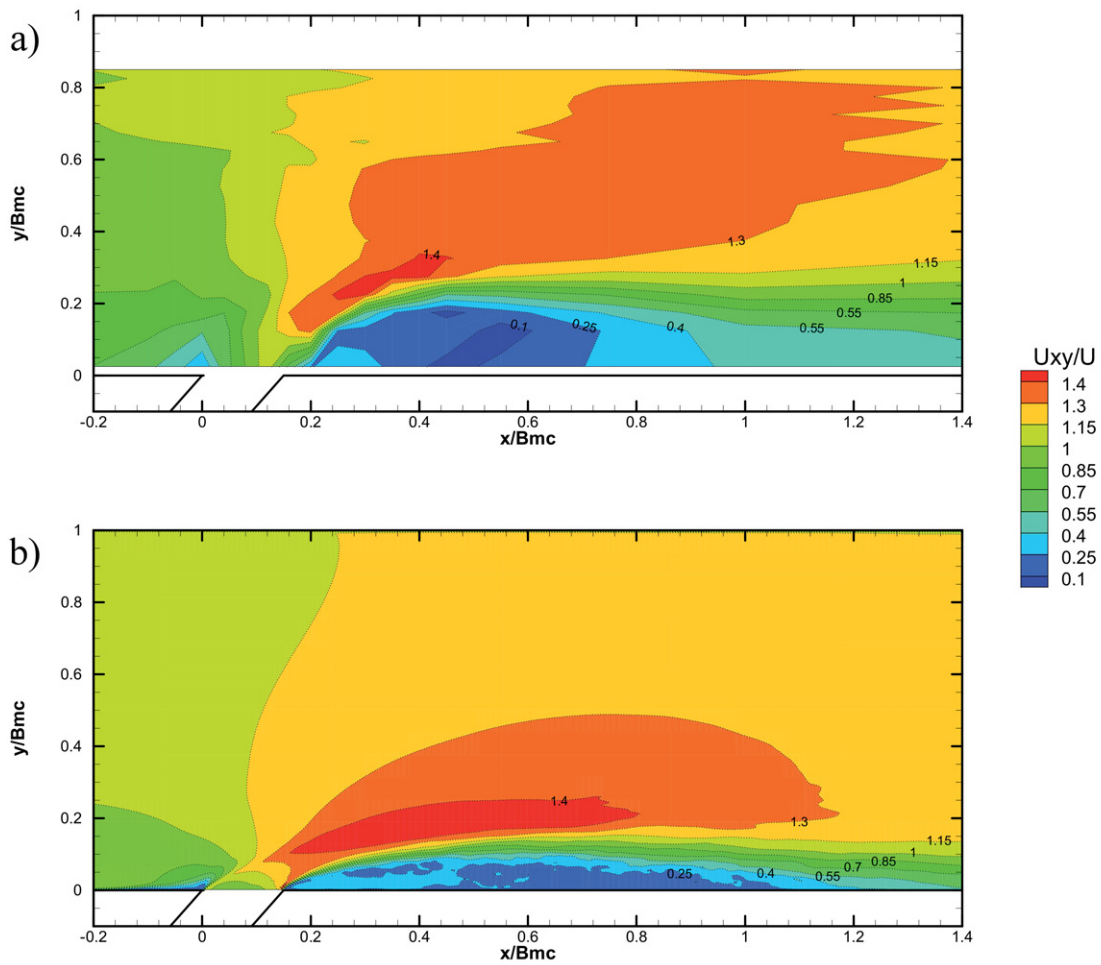


Figura 4.5: Magnitudes das velocidades médias adimensionais na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$: a) experimental; b) numérico.

à medida que o escoamento avança para jusante vai-se aproximando da parede. A zona de separação nos dados experimentais encontrar-se, aproximadamente, em $0.15 < x/B_{MC} < 1$, enquanto que nos resultados numéricos encontrar-se em $0.15 < x/B_{MC} < 1.20$ (Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6). De forma a facilitar a identificação das características desta zona apresenta-se, nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, a componente longitudinal adimensional da velocidade média em 4 secções transversais $x/B_{MC} = 0.16, 0.25, 0.45$ e 1 , respetivamente.

Em relação à zona de separação do escoamento, pode-se concluir que na secção $x/B_{MC} = 0.16$ (Figura 4.7) os resultados numéricos apresentam o início de recirculação para $\bar{u}/U \approx -0.10$. Contudo, a recirculação encontra-se muito próxima da parede e nos resultados experimentais não é claramente identificada, notando-se apenas uma redução de \bar{u}/U . Na secção $x/B_{MC} = 0.25$ (Figura 4.8), identifica-se, em ambos os resultados, a recirculação na zona de separação do escoamento (representada pela letra A). Nesta secção nota-se que a zona é mais

4.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E DADOS EXPERIMENTAIS

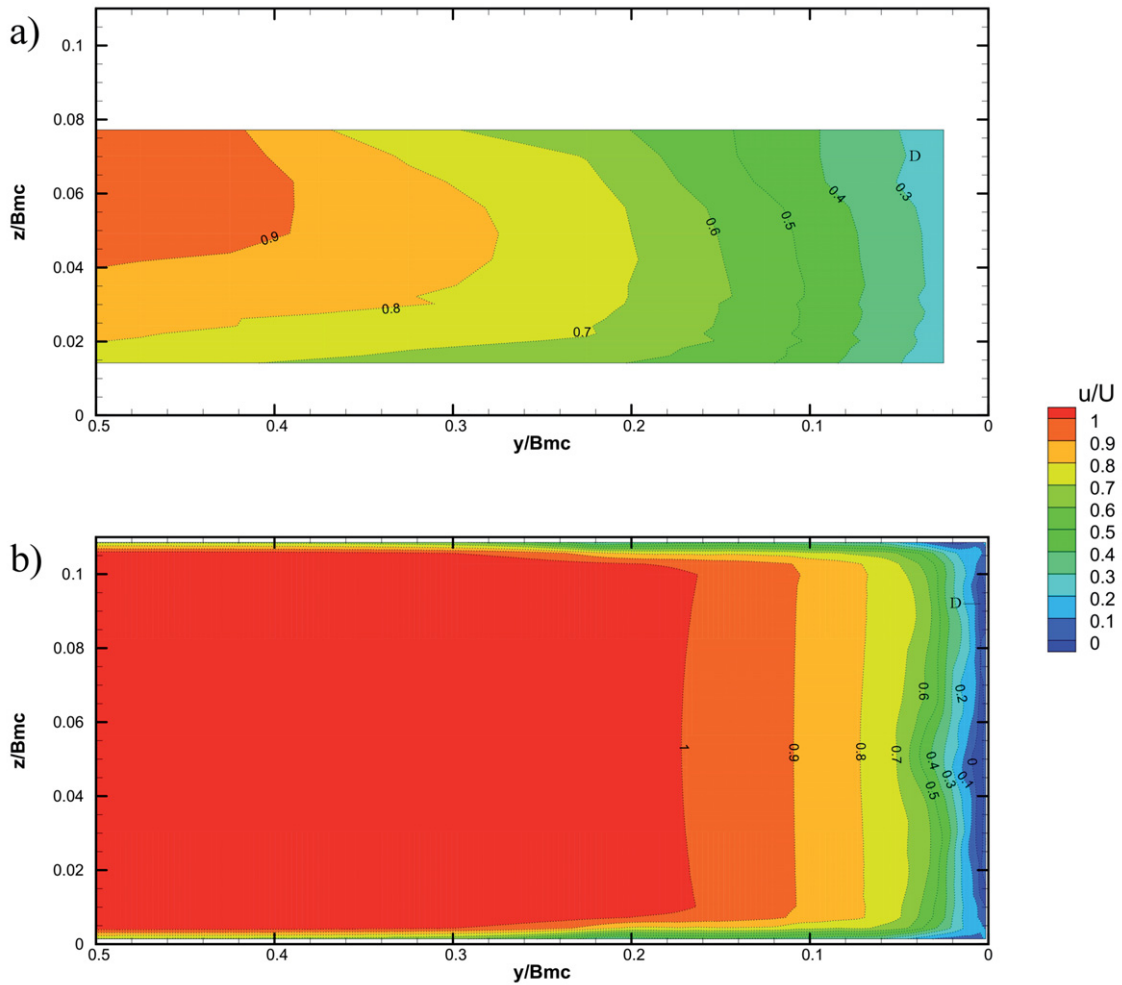


Figura 4.6: Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção transversal $x/B_{MC} = 0$: a) experimental; b) numérico.

larga nos resultados experimentais do que nos numéricos. No entanto, os valores mínimos da componente longitudinal adimensional da velocidade média são inferiores nos resultados do modelo LES ($\bar{u}/U \approx -0.40$) do que os identificados nos resultados experimentais ($\bar{u}/U \approx -0.35$). Nesta secção identifica-se ainda uma deslocação da recirculação, isto é, os valores mínimos de \bar{u}/U encontram-se mais próximos da superfície livre. Na secção $x/B_{MC} = 0.45$ (Figura 4.9) os valores mínimos de \bar{u}/U aumentam ligeiramente nos dados experimentais ($\bar{u}/U \approx -0.20$) e nos resultados numéricos ($\bar{u}/U \approx -0.25$). O local em que a recirculação é mais intensa aproximou-se da superfície livre e a largura da zona aumentou em ambos os resultados. Contudo, como referido anteriormente a largura desta zona é superior nos dados experimentais chegando a atingir valores de $y/B_{MC} \approx 0.21$. Enquanto que nos resultados numéricos a largura é no máximo $y/B_{MC} \approx 0.10$. Na última secção $x/B_{MC} = 1$ (Figura 4.10) pode-se identificar que os valores mínimos

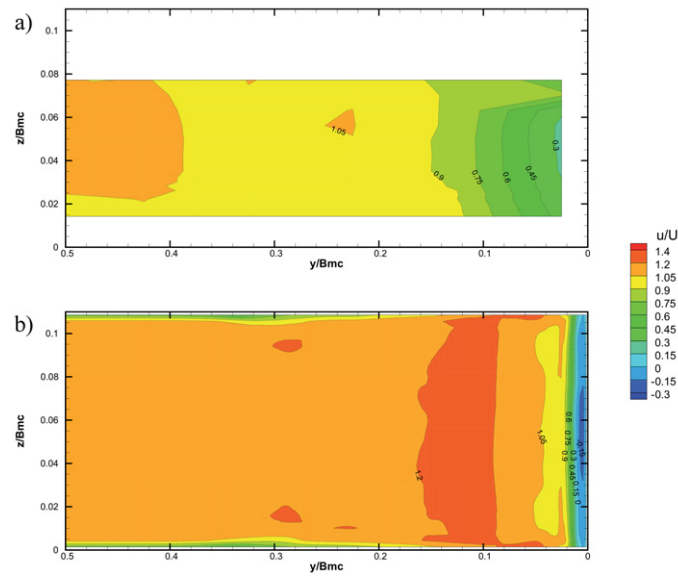


Figura 4.7: Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção transversal $x/B_{MC} = 0.16$: a) experimental; b) numérico.

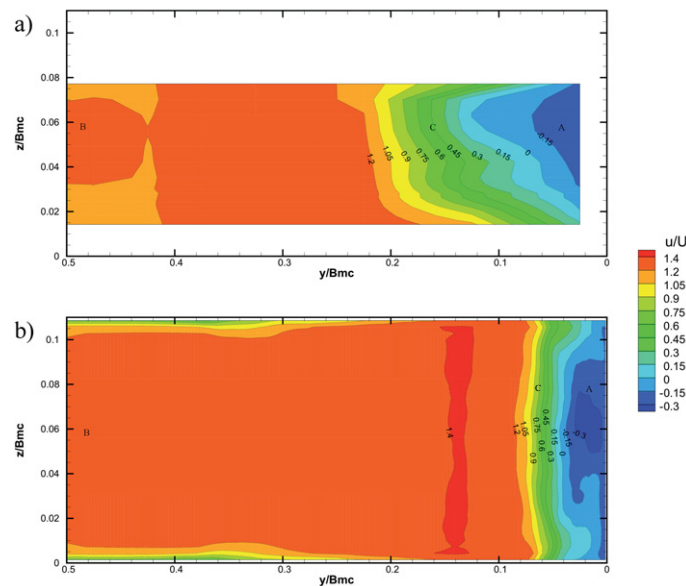


Figura 4.8: Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção transversal $x/B_{MC} = 0.25$: a) experimental; b) numérico.

de \bar{u}/U voltam a aumentar nos dados experimentais ($\bar{u}/U \approx 0.30$) e nos resultados numéricos ($\bar{u}/U \approx -0.05$). A zona de separação começa a aproximar-se da parede, mostrando que o escoamento começa a recuperar dos efeitos da confluência.

De forma a visualizar-se o desenvolvimento de \bar{u}/U no plano longitudinal, nas Figura 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam-se as distribuições de \bar{u}/U ao longo de 3 secções longitudinais, $z/H_{MC} = 0.18$, 0.48 e 0.65 , respetivamente.

A entrada do escoamento do TC no MC provoca uma mudança na direção do

4.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E DADOS EXPERIMENTAIS

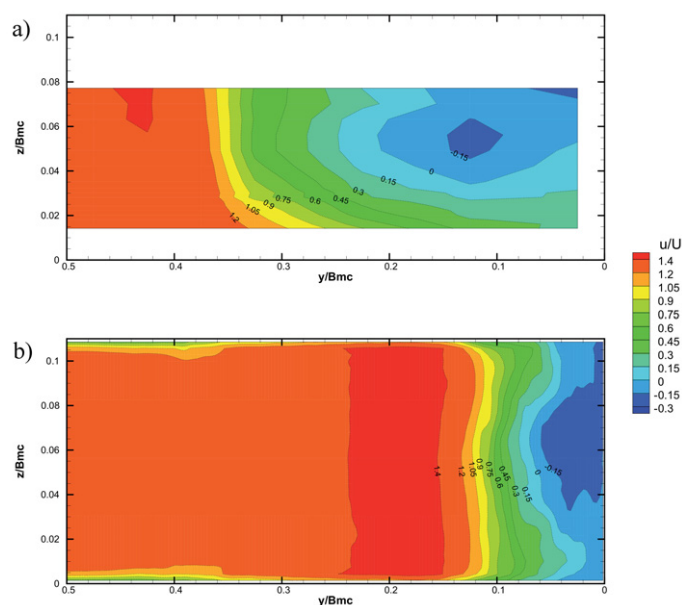


Figura 4.9: Componente longitudinal adimensional da velocidade média na seção transversal $x/B_{MC} = 0.45$: a) experimental; b) numérico.

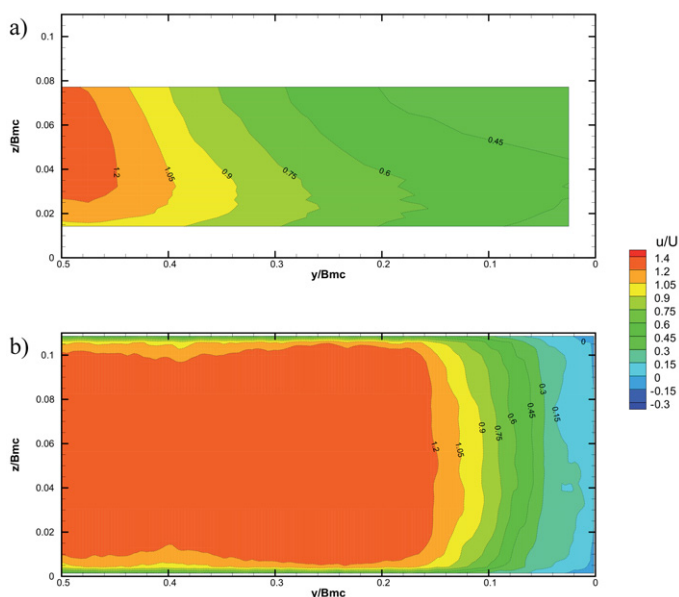


Figura 4.10: Componente longitudinal adimensional da velocidade média na seção transversal $x/B_{MC} = 1$: a) experimental; b) numérico.

escoamento. Esta mudança de direção é mais acentuada nos resultados experimentais, onde identifica-se um ângulo entre a parede do MC e linha de corrente de $\approx 40^\circ$, enquanto que nos resultados numéricos o ângulo é de $\approx 30^\circ$ (como se pode visualizar na Figura 4.12). Consequentemente, o início da zona de velocidade máxima vai estar mais afastada do TC no experimental do que no numérico.

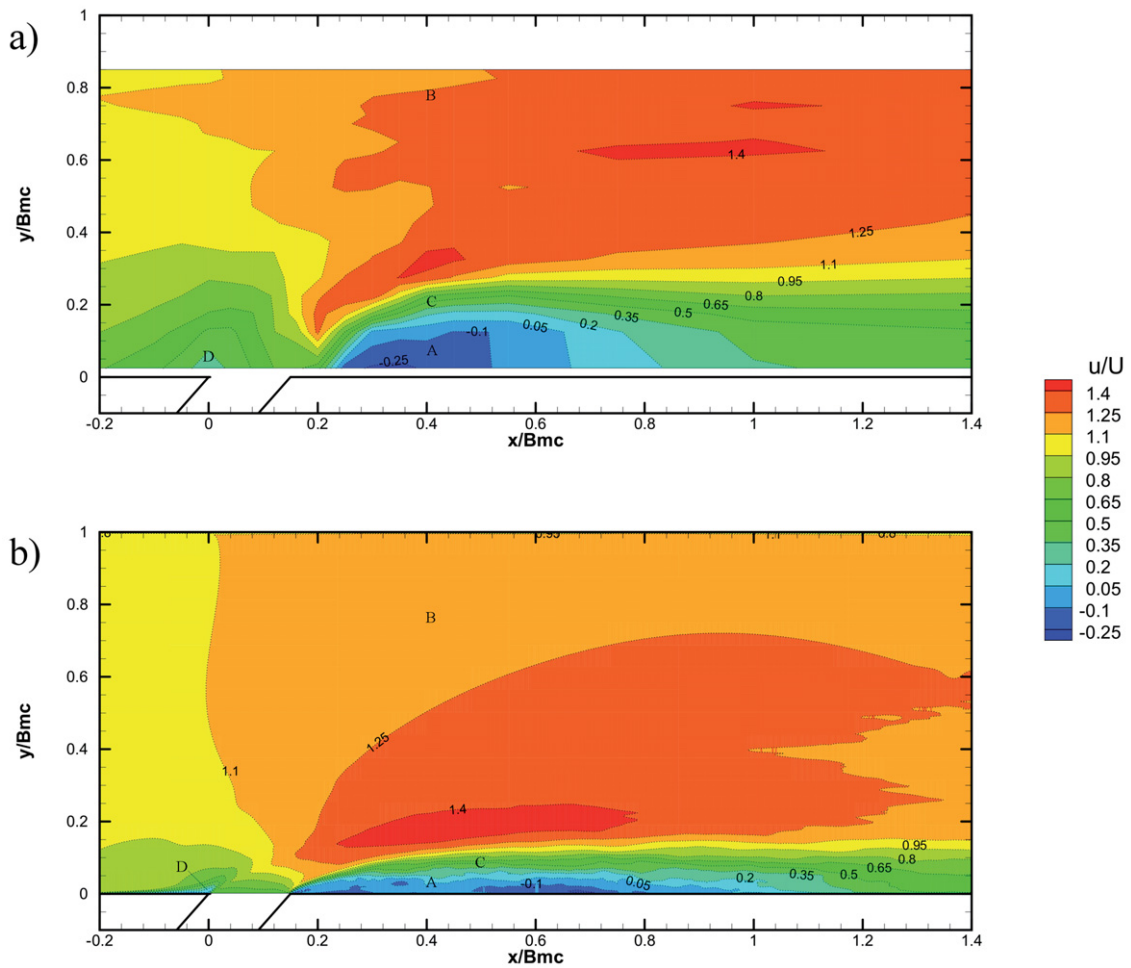


Figura 4.11: Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.18$: a) experimental; b) numérico.

Como identifica-se nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.11, 4.12 e 4.13 a zona de velocidade máxima encontra-se entre $0.26 < y/B_{MC} < 1$ para os dados experimentais e entre $0.17 < y/B_{MC} < 1$ para os resultados numéricos (esta zona encontra-se identificada na Figura 4.11 pela letra B). Como mencionado na Secção 2.1.4, a formação desta zona deve-se ao efeito de contração do escoamento provocado pelo aumento da largura da zona de separação. Desta forma, a velocidade vai ser máxima quando a largura da zona de separação for maior. Contudo, apesar da largura da zona de separação ser maior nos resultados experimentais, os valores máximos de \bar{u}/U encontram-se nos resultados numéricos. Assim, pode-se afirmar que o modelo LES sobrestima os valores máximos de \bar{u}/U , uma vez que, para a secção transversal $x/B_{MC} = 0.45$, nos resultados numéricos o valor máximo é de $\bar{u}/U \approx 1.5$, enquanto que nos resultados experimentais o valor máximo é de

4.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E DADOS EXPERIMENTAIS

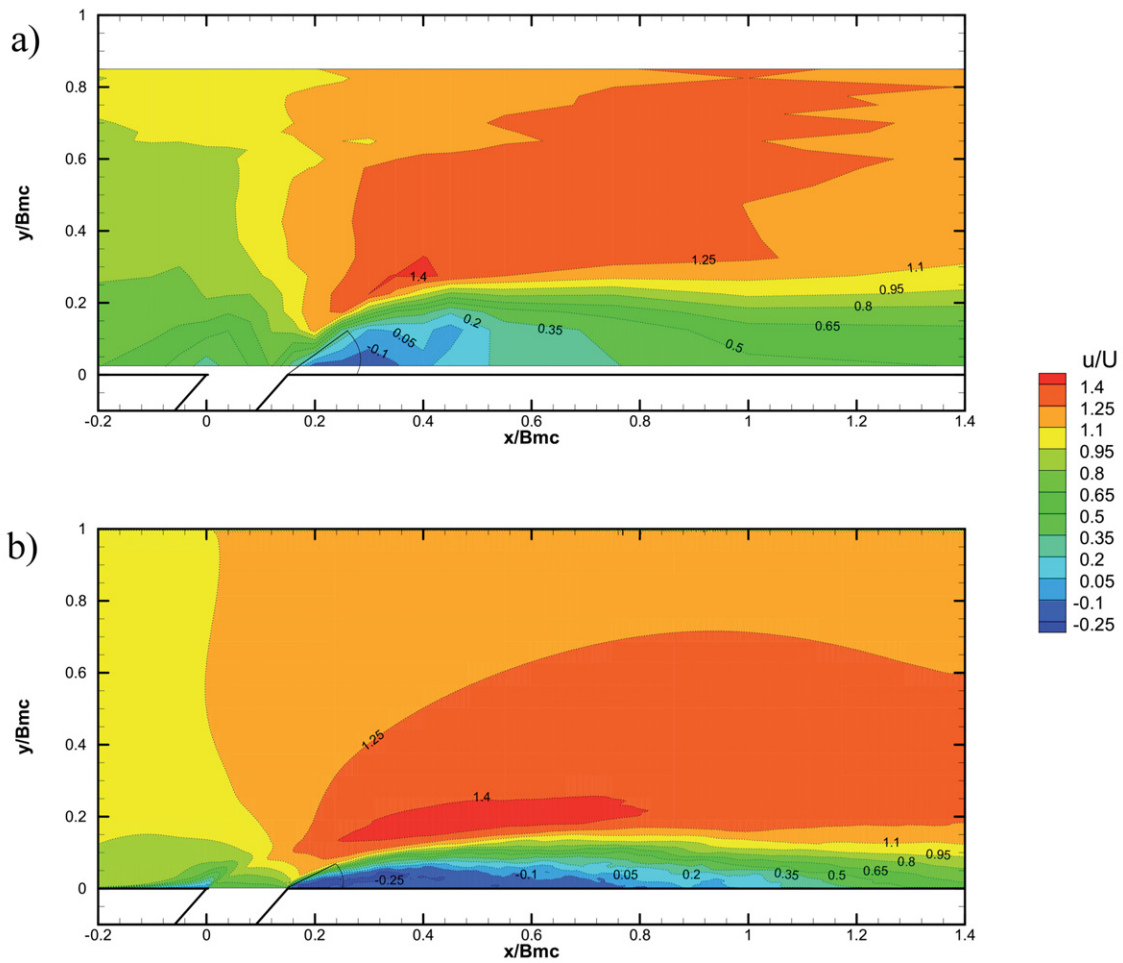


Figura 4.12: Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.48$: a) experimental; b) numérico.

$\bar{u}/U \approx 1.42$, existindo um erro relativo de $\approx 5\%$. Mesmo assim, em ambos os resultados estas velocidades máximas encontram-se próximas do TC, mais especificamente, quando $y/B_{MC} < 0.35$. Também identifica-se que para $y/B_{MC} > 0.50$, \bar{u}/U e U_{xy}/U numéricos e experimentais apresentam valores semelhantes e mantêm-se aproximadamente constantes.

Nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 identifica-se ainda uma camada entre a zona de separação do escoamento e a zona de velocidade máxima (representada pela letra C na Figura 4.11). Como mencionado na Secção 2.1.5, o contacto entre essas duas zonas gera a MI. A MI é caracterizada por um aumento da intensidade turbulenta e por gradientes de velocidade verticais elevados. Contudo, \bar{w}/U não são apresentadas, uma vez que, numericamente os resultados não foram claros e conclusivos quanto à existência da MI, exibindo apenas valores ligeiramente elevados na zona de recirculação. Experimentalmente, o ADV usado não consegue representar estes resultados, sendo que \bar{w} é inferior à precisão de medição.

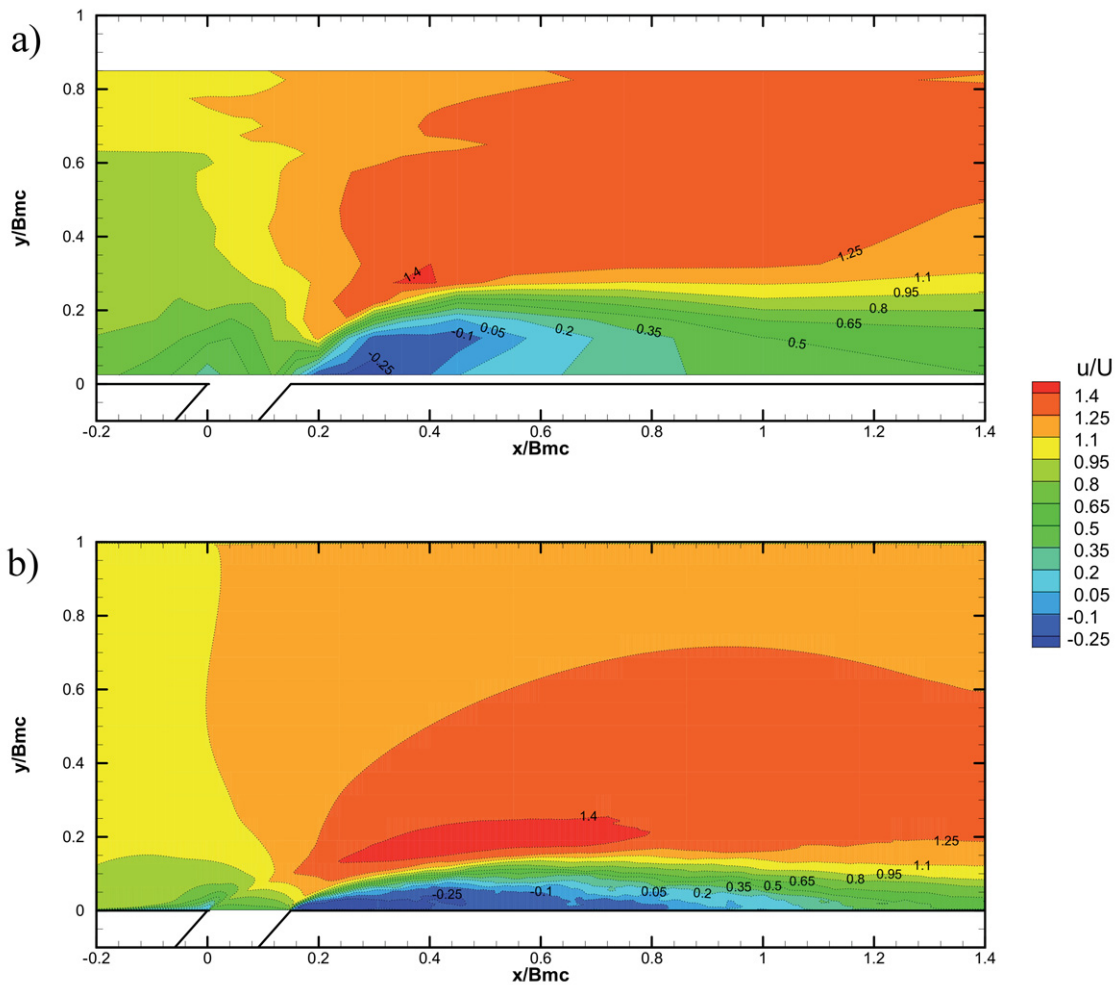


Figura 4.13: Componente longitudinal adimensional da velocidade média na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$: a) experimental; b) numérico.

Na Figura 4.14 apresenta-se \bar{U}_{xy}/U na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$ com início em $x/B_{MC} = -0.20$ até ao último ponto medido longitudinalmente.

Na Figura 4.14, observa-se que para $x/B_{MC} > 1.4$ o escoamento começa a recuperar dos efeitos da presença da confluência. Isto é, os gradientes de velocidade retornam, gradualmente, a ter valores unitários e as linhas de corrente voltam a ser paralelas às paredes do MC. Contudo, nos resultados experimentais, nota-se que como a zona de separação tem comprimento inferior à dos resultados numéricos, o escoamento começa a recuperação em $x/B_{MC} \approx 1.2$. De acordo com a Secção 2.2.6, identifica-se a presença da zona de recuperação do escoamento, que começa a jusante da zona de separação. Como esta zona de recuperação também é caracterizada pela diminuição dos gradientes de velocidade transversal, na Figura 4.15 apresentam-se as velocidades transversais para a secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$, com início em $x/B_{MC} = -0.2$ até ao último ponto medido

4.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E DADOS EXPERIMENTAIS

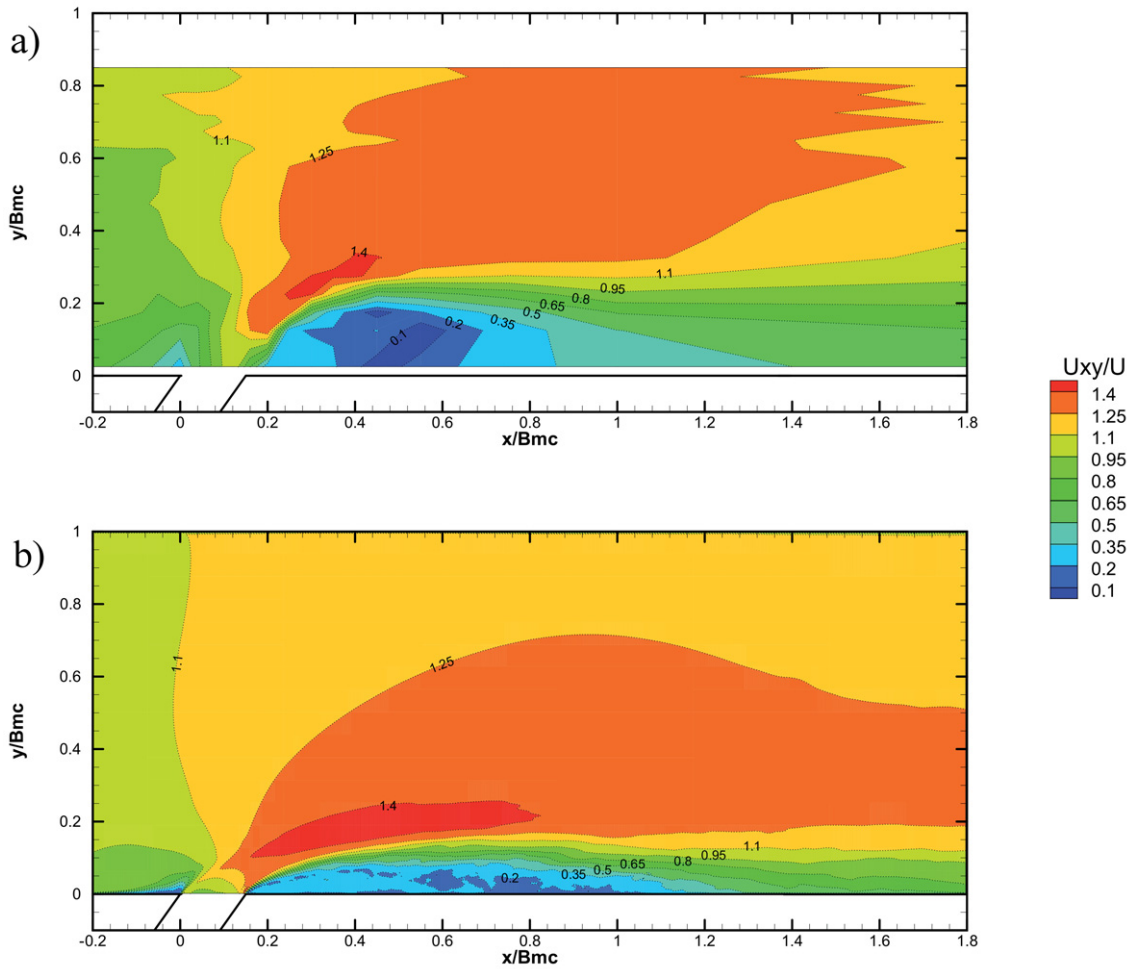


Figura 4.14: Magnitudes das velocidades médias adimensionais na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$: a) experimental; b) numérico.

longitudinalmente.

Na Figura 4.15 identifica-se que os resultados numéricos prevêm uma zona de recuperação do escoamento semelhante aos resultados experimentais, uma vez que para $x/B_{MC} > 1$ os valores $\bar{v}/U \approx 0$.

Em relação à componente transversal adimensional da velocidade média \bar{v}/U , os resultados numéricos apresentam boa concordância com os dados experimentais. Em ambos os resultados identifica-se um aumento nas velocidades transversais próximas à parede a jusante do TC. Contudo, o modelo LES prevê \bar{v}/U mais elevada que o ensaio experimental, $\bar{v}/U \approx 0.95$ e $\bar{v}/U \approx 0.90$, respetivamente. Tal como na componente longitudinal da velocidade média, o erro relativo é aproximadamente 5%. Identifica-se também que nos resultados experimentais o pico das velocidades encontra-se em $y/B_{MC} \approx 0.125$, enquanto que nos resultados numéricos as velocidades mais elevadas encontram-se próximas da parede do TC. Contudo, para valores de $y/B_{MC} > 0.25$, os resultados experimentais e numéricos

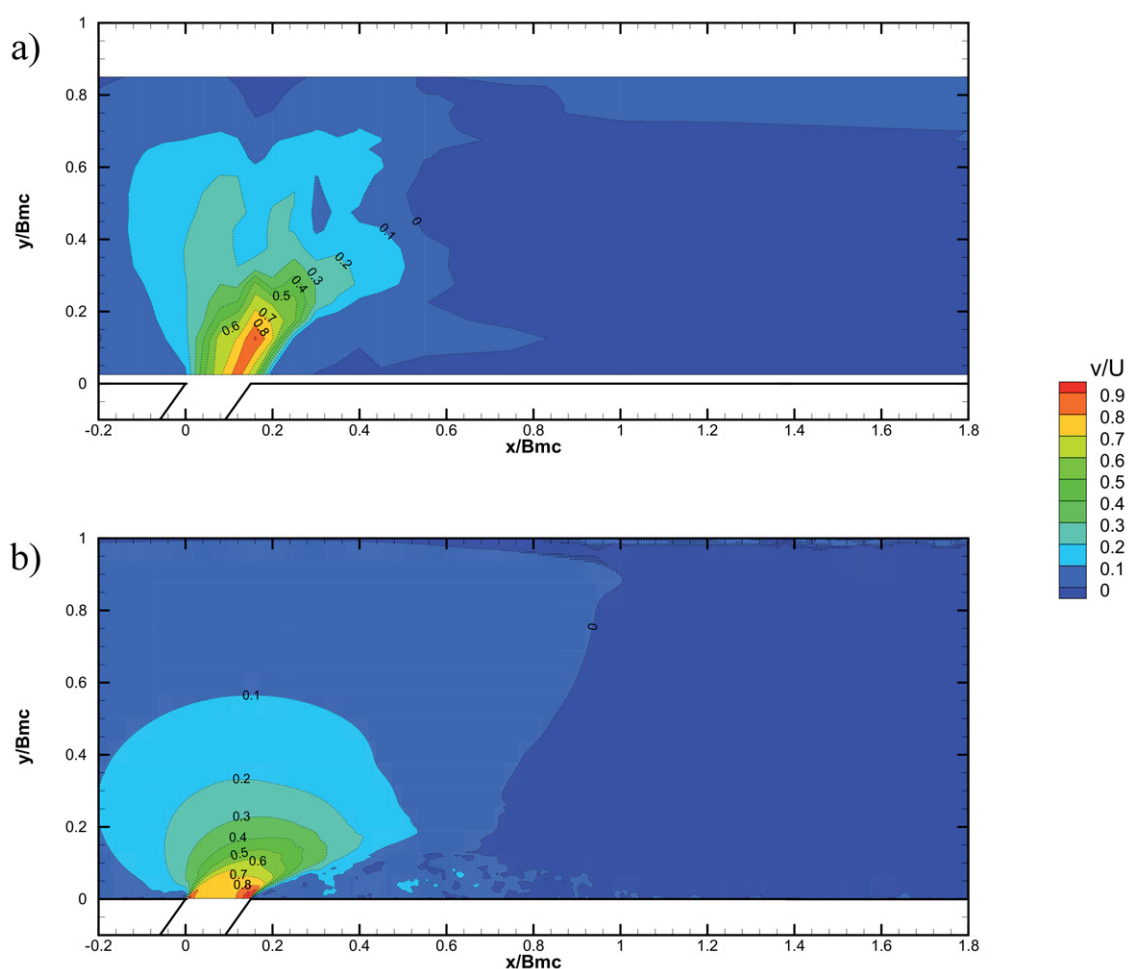


Figura 4.15: Componente transversal adimensional da velocidade média na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$: a) experimental; b) numérico.

são semelhantes e à medida que o escoamento avança para jusante as velocidades transversais vão diminuindo. Na Figura 4.15 identifica-se também que para valores de $x/B_{MC} > 1$ as velocidades transversais são maioritariamente nulas, existindo apenas algumas flutuações muito próximo das paredes.

4.3 Considerações finais

De modo geral os resultados numéricos apresentam boa concordância com os dados experimentais. No entanto, existem algumas diferenças entre os resultados experimentais e numéricos. Estas diferenças podem ser atribuídas a diversos fatores como por exemplo: ao facto do LES não ter capacidade para capturar todas as características físicas presentes na zona de separação, a erros nas medições experimentais ou mesmo à malha do Vectorino ser demasiado grosseira. Contudo, pode-se concluir que os resultados numéricos transmitem confiança suficiente

para simular escoamentos 3D em confluências. Portanto, validado o modelo numérico procede-se à realização de um estudo mais aprofundado com o apoio de diversos parâmetros de forma a facilitar a identificação de várias características presentes neste tipo de escoamento.

ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Este capítulo é dedicado à análise dos resultados numéricos. Inicialmente estuda-se as intensidades turbulentas de modo a compreender a sua distribuição ao longo do escoamento. Seguidamente analisa-se a estabilidade adimensional, uma vez que este parâmetro permite compreender de que modo o atrito no leito contribui para o desenvolvimento da MI. Seguidamente estuda-se a vorticidade vertical e longitudinal. Por fim, é dada relevância à anisotropia do escoamento, uma vez que permite compreender o desenvolvimento das estruturas turbulentas.

5.1 Intensidades turbulentas

Na Figura 5.1 apresenta-se a componente longitudinal adimensional da intensidade turbulenta média (I_x), calculada da seguinte forma $I_x = \sqrt{u'^2}/U$ onde u' é a componente longitudinal das flutuações da velocidade, para $z/H_{MC} = 0.18, 0.48$ e 0.65 .

Na Figura 5.1 pode-se identificar que I_x é mais elevada para $y/B_{MC} < 0.2$ e para valores superiores de y/B_{MC} são praticamente nulas. Identifica-se que à medida que z/H_{MC} aumenta também I_x aumenta, sendo o seu máximo $I_x \approx 0.45$ na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.65$ (Figura 5.1c). Como mencionado na Secção 2.1.5, a MI é caracterizada por um aumento da intensidade de turbulência nas direções vertical e longitudinal. Assim, como se observa na Figura 5.1, a zona onde I_x vai ser mais elevada distribui-se ao longo da MI (a MI está identificada na Figura 5.1 pela letra C), especialmente para valores de $x/B_{MC} < 0.6$ e valores de $y/B_{MC} < 0.2$. Contudo, observa-se também que vai existir um aumento considerável de

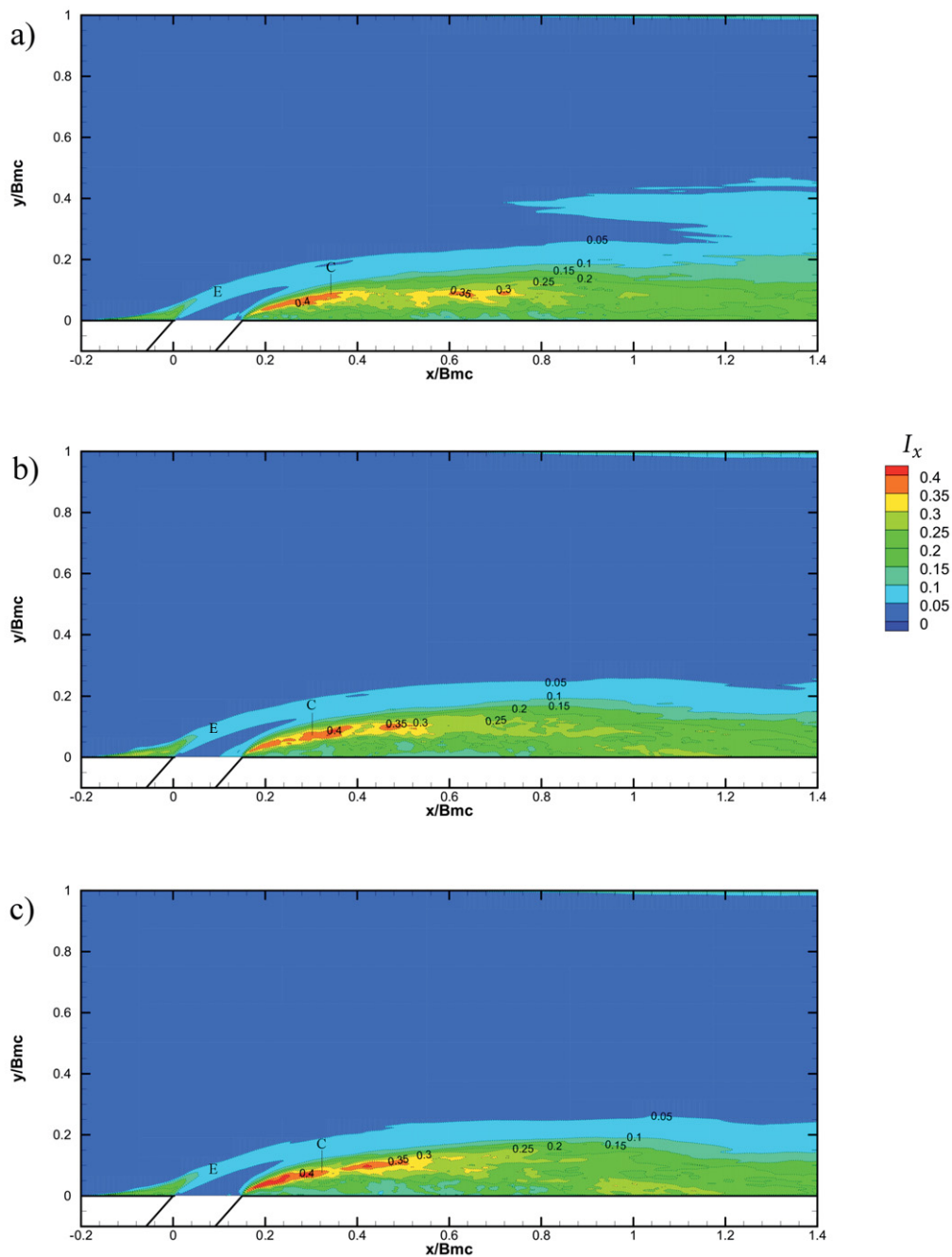


Figura 5.1: Componente longitudinal adimensional da intensidade turbulenta nas secções longitudinais: a) $z/H_{MC} = 0.18$; b) $z/H_{MC} = 0.48$; c) $z/H_{MC} = 0.65$.

I_x próximo do vértice a montante do TC (zona de estagnação) e no interior da zona de separação do escoamento. Apesar de existir um aumento considerável de I_x nestas duas zonas, I_x continua a ser inferior na MI. Na Figura 5.1 ainda se observa um ligeiro aumento $I_x \approx 0.1$ que retrata a deflexão do escoamento (que está representada na Figura 5.1 pela letra E).

Na Figura 5.2 apresenta-se a componente transversal adimensional da intensidade turbulenta média (I_y), calculada da seguinte forma $I_y = \sqrt{v'^2}/U$ onde v' é a componente transversal das flutuações da velocidade, para $z/H_{MC} = 0.18, 0.48$ e 0.65 .

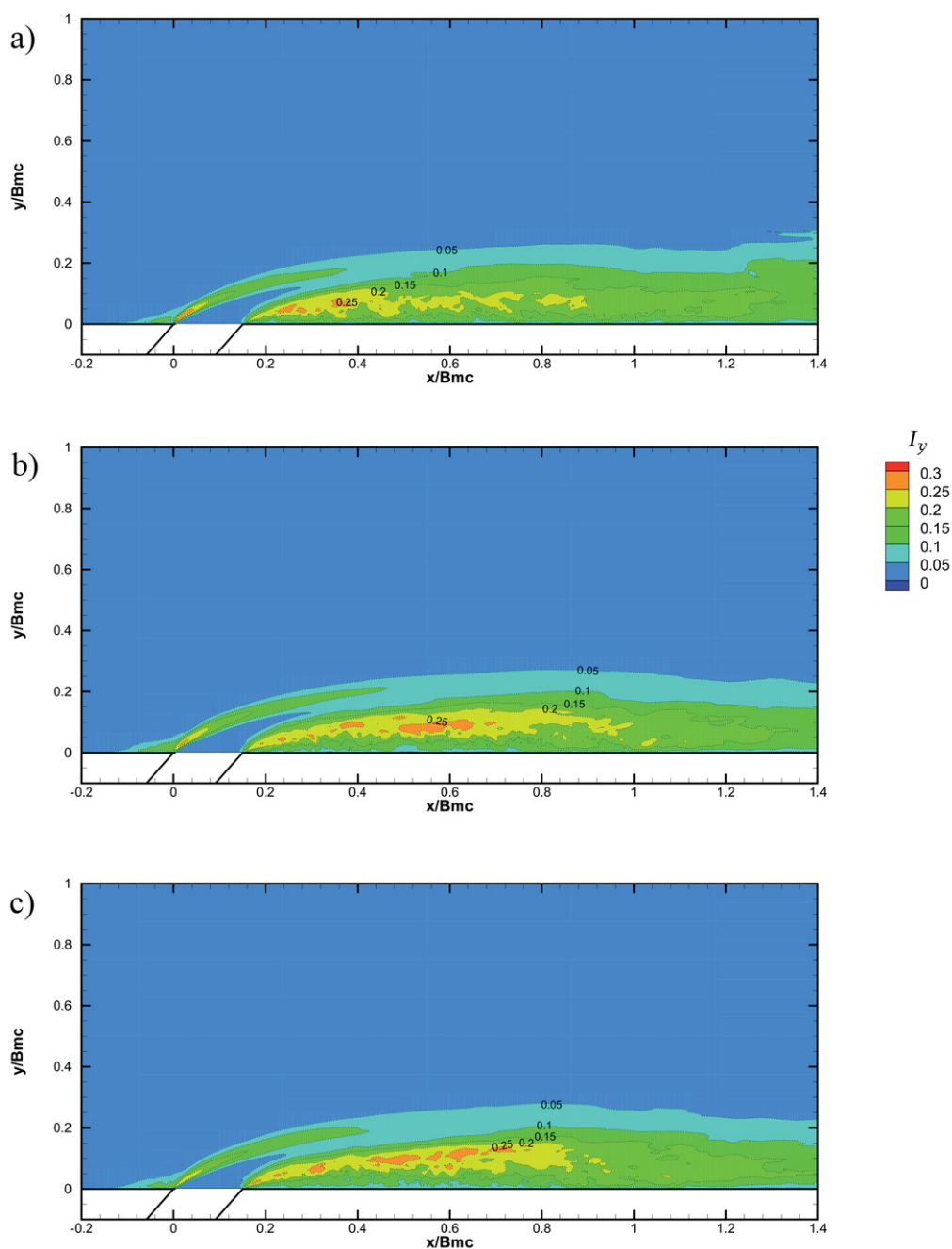


Figura 5.2: Componente transversal adimensional da intensidade turbulenta nas secções longitudinais: a) $z/H_{MC} = 0.18$; b) $z/H_{MC} = 0.48$; c) $z/H_{MC} = 0.65$.

Na Figura 5.2 observa-se que tal como I_x , também I_y é elevada na MI e para valores de $y/B_{MC} > 0.5$ são ambas nulas. Contudo, o valor máximo de $I_y \approx 0.28$

ocorre no início da zona de deflexão do escoamento, para $x/B_{MC} \approx 0.02$ e $y/B_{MC} \approx 0.02$ na secção longitudinal $z/H_{MC} = 0.18$. Na Figura 5.2 observa-se também que a zona de deflexão encontra-se bem identificada. Como já mencionado na Secção 2.1.2, a entrada do escoamento do TC no MC altera a direção dos vetores velocidade, ficando com uma componente de velocidade transversal mais elevada. Ao contrário de I_x o máximo de I_y diminui à medida que z/H_{MC} aumenta. Identifica-se também que na zona de recirculação e na zona de estagnação do escoamento I_y é mais elevada.

Na análise conjunta das Figuras 5.1 e 5.2 observa-se que à medida que o escoamento avança para jusante, as intensidades turbulentas expandem-se lateralmente e dissipam-se, o que indica que o escoamento começa a recuperar dos efeitos da confluência. Como apresentado na Secção 4.2, para valores de $x/B_{MC} > 1.2$ o escoamento começa a recuperar destes efeitos, apresentando valores próximos de zero em ambas as componentes da intensidade turbulenta.

5.2 Estabilidade adimensional

Em escoamentos pouco profundos a turbulência na MI é altamente anisotrópica, sendo caracterizada como quase bidimensional. Como nesta dissertação o escoamento pode ser considerado pouco profundo, os efeitos de atrito no leito podem-se tornar um parâmetro importante no estudo da MI e, por esta razão, Rhoads e Sukhodolov (2008) consideraram que estes efeitos podem ser expressos pela estabilidade adimensional da MI (S_{ml}), dada por:

$$S_{ml} = c_f \frac{\delta \bar{U}_c}{h \Delta \bar{U}} \quad (5.1)$$

onde

$$\delta = \frac{\Delta \bar{U}}{(\partial \bar{U} / \partial y)_{max}} \quad (5.2)$$

e

$$\bar{U}_c = (\bar{U}_1 + \bar{U}_2) / 2 \quad (5.3)$$

onde c_f é o coeficiente da lei quadrática do atrito, δ é a largura da camada de mistura, h é a profundidade do escoamento, \bar{U}_c é a velocidade média da secção, \bar{U}_1 e \bar{U}_2 são as velocidades máxima e mínima na secção transversal, respetivamente, $\Delta \bar{U}$ é a variação das velocidades e $(\partial \bar{U} / \partial y)_{max}$ é o gradiente lateral máximo da velocidade média (Rhoads e Sukhodolov, 2008).

O parâmetro S_{ml} pode ser interpretado como uma medida do rácio entre a dissipação e a produção de energia cinética contida nas células do tamanho da malha. O valor crítico da estabilidade adimensional da MI (S_{mlc}) mostra um equilíbrio na produção e dissipação de energia cinética. As análises de estabilidade desenvolvidas por Rhoads e Sukhodolov (2008) indicam um valor de S_{mlc} entre 0.06 e 0.12. Para $S_{ml} \ll S_{mlc}$ os efeitos que o atrito no leito tem no crescimento das instabilidades são negligenciáveis e as estruturas turbulentas de grande dimensão desenvolvem-se no interior da MI. Quando $S_{ml} > S_{mlc}$ os efeitos dissipativos de atrito no leito são dominantes e o crescimento das instabilidades não ocorre.

Além de S_{ml} , Rhoads e Sukhodolov (2008) utilizaram também outro parâmetro para estudar a MI. Este parâmetro é a estabilidade adimensional (S_W) que, está relacionada com a estrutura turbulenta que se forma na MI e é calculada da seguinte forma:

$$S_W = c_f \frac{D}{h} \quad (5.4)$$

onde D é a largura da zona de estagnação.

Segundo Rhoads e Sukhodolov (2008) pode-se identificar 3 tipos de estruturas da esteira para $S_W < 0.2$, $0.2 < S_W < 0.5$ e $S_W > 0.5$. Quando $S_W < 0.2$ desenvolve-se uma "estrada" de vórtices com um mecanismo de derramamento de vórtices oscilatórios. Quando $0.2 < S_W < 0.5$, desenvolve-se uma esteira instável com uma bolha de recirculação anexada e com crescimento nas instabilidades a jusante da bolha. E por fim, quando $S_W > 0.5$ desenvolve-se uma esteira estável com uma bolha de recirculação anexada e sem crescimento das instabilidades a jusante da bolha. O desenvolvimento da "estrada" de vórtices, caracterizada por vórtices oscilatórios transversais de grande escala, ou é a marca da instabilidade absoluta ou do crescimento de uma pequena perturbação ao longo do tempo numa zona no escoamento (Rhoads e Sukhodolov, 2008).

De acordo com os resultados numéricos obtidos e com as equações dadas por Rhoads e Sukhodolov (2008), o valor da estabilidade adimensional obtido foi $S_W = 0.0028$. O que significa que a esteira é altamente instável e deve levar à geração de vórtices turbulentos e como pode ser observado na Secção 5.1, as instabilidades turbulentas ao longo da MI são elevadas.

Na Figura 5.3 apresenta-se o perfil da componente longitudinal da velocidade média representada ao longo de 4 secções transversais $x/B_{MC} = 0.16, 0.25, 0.45$ e 1.

Com apoio da Figura 5.3 observa-se que para $0.16 < x/B_{MC} < 1$, o perfil da componente longitudinal da velocidade média segue o mesmo padrão, apesar

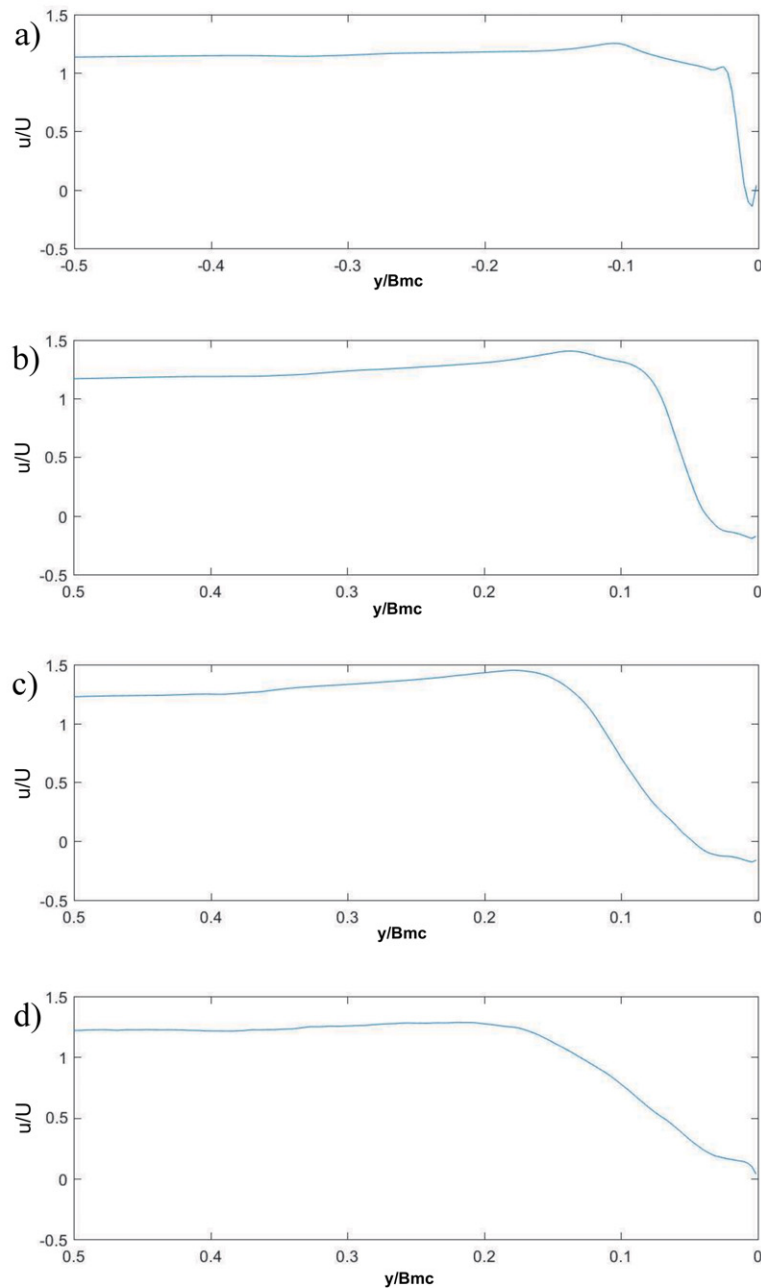


Figura 5.3: Perfil da componente longitudinal da velocidade média nas secções transversais: a) $x/B_{MC} = 0.16$; b) $x/B_{MC} = 0.25$; c) $x/B_{MC} = 0.45$; d) $x/B_{MC} = 1$.

de existirem algumas diferenças. Como visto na Secção 4.2, identificam-se claramente 3 zonas importantes de acordo com o perfil de velocidade. A zona de velocidade máxima em $0.2 < y/B_{MC} < 1$ (apesar de variar ao longo de x/B_{MC}). A zona de separação que é caracterizada por velocidades reduzidas e recirculação (velocidades negativas). A MI encontra-se presente entre a zona de velocidade máxima e a zona de separação e é caracterizada pelo declive do perfil.

Assim, com o apoio do perfil de velocidade (Figura 5.3) calculou-se a S_{ml} para

as secções transversais. Nestas secções os valores encontravam-se no intervalo $2.21 \times 10^{-4} < S_{ml} < 2.48 \times 10^{-4}$. Estes valores são muito inferiores ao valor crítico. Segundo Rhoads e Sukhodolov (2008), quando $S_{ml} \ll S_{mlc}$ os efeitos de atrito do leito no crescimento das instabilidades são negligenciáveis. Esta condição era um dos objetivos pretendidos da simulação numérica, uma vez que, nesta simulação não se tem em conta o efeito da rugosidade do leito no desenvolvimento do escoamento (as paredes do domínio computacional foram consideradas lisas).

5.3 Vorticidade vertical

Na Figura 5.4 apresenta-se a vorticidade vertical instantânea adimensional (ω_z), calculada da seguinte forma $\omega_z = (\partial v / \partial x - \partial u / \partial y) / (H/U)$, na secção longitudinal $z/B_{MC} = 0.65$ em três instantes de tempo diferentes.

Como pode ser observado na Figura 5.4, o modelo LES consegue reproduzir o movimento instantâneo do escoamento, pois à medida que o intervalo de tempo aumenta a vorticidade no plano longitudinal vai-se alterando, uma vez que o escoamento está em constante evolução. Identifica-se também que apenas existem variações significativas na ω_z para $y/B_{MC} < 0.4$, isto é na zona de estagnação, de deflexão, de separação do escoamento e na MI. Observa-se que nos três instantes de tempo a mesma zona pode ter ω_z muito elevadas e pode ter ω_z muito baixas chegando a ser negativas.

De acordo com a Secção 2.1.5, a MI é formada pelas instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Na Figura 5.4 é possível observar-se que o modelo LES consegue reproduzir com boa precisão o escoamento instantâneo e identifica-se claramente que a MI é formada pelas instabilidades de kelvin-Helmholtz. À medida que o escoamento avança para jusante ω_z dissipa-se lateralmente (como pode-se identificar nas Figuras 5.4a e 5.4c, notando-se a presença de vorticidade em $x/B_{MC} \approx 1$ e $y/B_{MC} \approx 0.35$).

Na Figura 5.5 apresenta-se a vorticidade vertical média adimensional ($\bar{\omega}_z$), calculada da seguinte forma $\bar{\omega}_z = (\partial \bar{v} / \partial x - \partial \bar{u} / \partial y) / (H/U)$, na secção longitudinal $z/B_{MC} = 0.65$. Este resultado é consistente com uma simulação com o modelo RANS, uma vez que este modelo resolve apenas o escoamento médio.

Na Figura 5.5 observa-se notavelmente a deflexão que o escoamento do MC tem devido à entrada do escoamento do TC e identifica-se que é próximo do vértice a montante do TC, na zona de deflexão, que a $\bar{\omega}_z$ é mais elevada. Contudo, existe também o aumento de $\bar{\omega}_z$ próximo do vértice a jusante do TC, o que dá a entender que existe também uma ligeira deflexão a jusante da zona de deflexão,

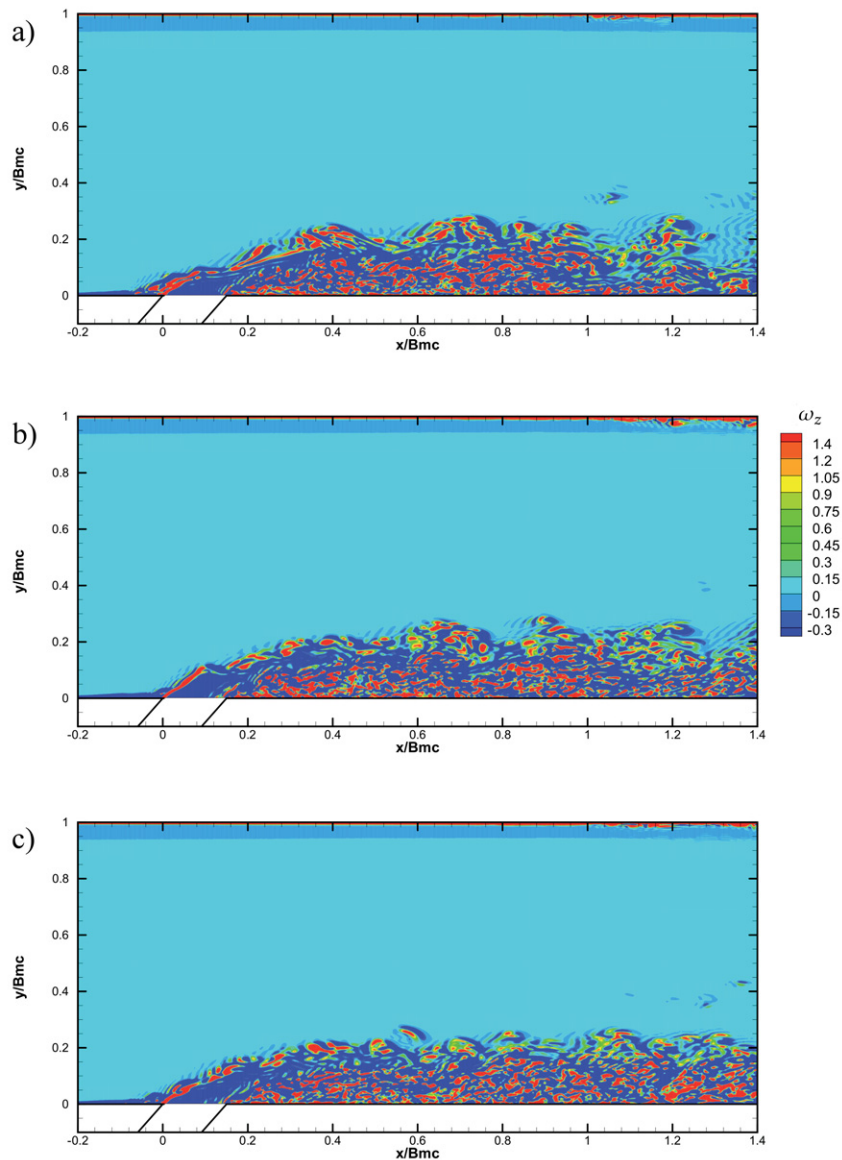


Figura 5.4: Vorticidade vertical instantânea adimensional na secção longitudinal $z/B_{MC} = 0.65$ para três instantes de tempo diferentes: a) $t = 0$ s; b) $t = 10$ s; c) $t = 20$ s.

que pode ser causada pela separação do escoamento da parede no início da zona de separação. Pode ainda concluir-se que à medida que o escoamento avança para jusante, vai-se expandindo lateralmente e dissipando-se. Como era expectável, na zona de separação, a vorticidade mais elevada vai encontrar-se junto da parede.

Na análise conjunta das Figuras 5.4 e 5.5, observa-se a diferença que existe entre os resultados instantâneos (Figura 5.4) e os resultados médios (Figura 5.5). Nos resultados instantâneos identificam-se de que forma a vorticidade evolui ao longo do tempo e, é nestes resultados que se consegue identificar as instabilidades de Kelvin-Helmholtz, razão pela qual existe a formação da MI. Como um dos

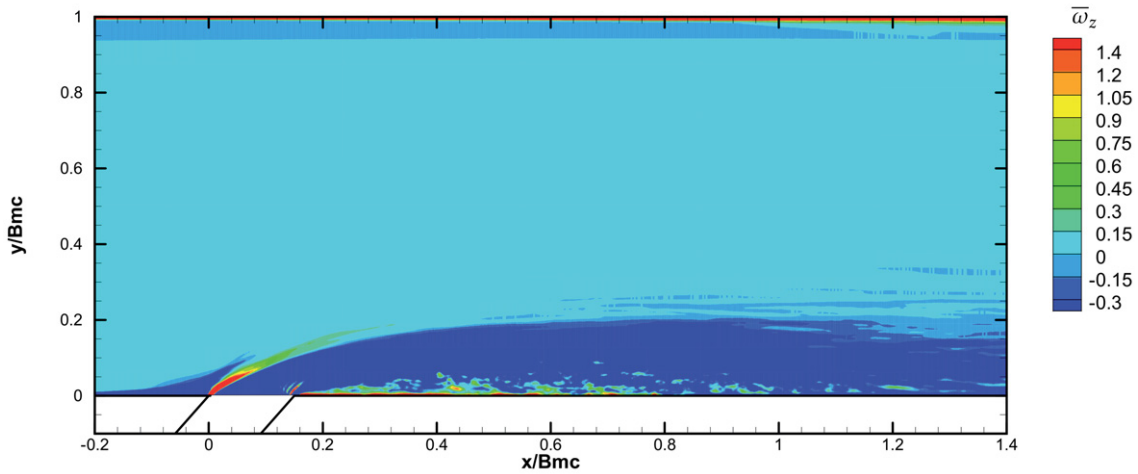


Figura 5.5: Vorticidade vertical média adimensional na secção longitudinal $z/B_{MC} = 0.65$.

objetivos desta dissertação é estudar as diversas zonas presentes no escoamento de uma confluência, se apenas se estudasse o escoamento médio (Figura 5.5) seria impossível identificar a forma da MI instantaneamente. Assim, pode-se concluir que para estudar as principais características do escoamento numa confluência é mais adequado recorrer ao modelo LES do que ao modelo RANS.

5.4 Vorticidade longitudinal

Na Figura 5.6 apresenta-se a vorticidade longitudinal instantânea adimensional (ω_x) na secção transversal $x/B_{MC} = 0.25$ em três instantes de tempo.

Tal como observado na vorticidade vertical, também na vorticidade longitudinal identifica-se o desenvolvimento instantâneo no escoamento. Na Figura 5.6 verifica-se que apesar do escoamento variar ao longo do tempo existem, nos três instantes de tempo, picos de ω_x próximos do leito para $0.35 < y/B_{MC} < 0.19$. Observa-se também que existem picos de vorticidade na zona de separação do escoamento para $0.2 < y/B_{MC} < 0$ e, é nesta zona onde os valores de ω_x vão ter os seus extremos. Identifica-se também que à medida que y/B_{MC} aumenta, os valores da vorticidade vão diminuindo. Para valores de $y/B_{MC} > 0.5$ a vorticidade longitudinal é aproximadamente nula.

Na Figura 5.7 apresenta-se a vorticidade longitudinal média adimensional ($\bar{\omega}_x$) em duas secções transversais, $x/B_{MC} = 0.16$ e 0.25 .

Na Figura 5.7 observa-se que os picos de intensidade da vorticidade longitudinal do escoamento encontram-se próximos do leito para $0.15 < y/B_{MC} < 0.35$

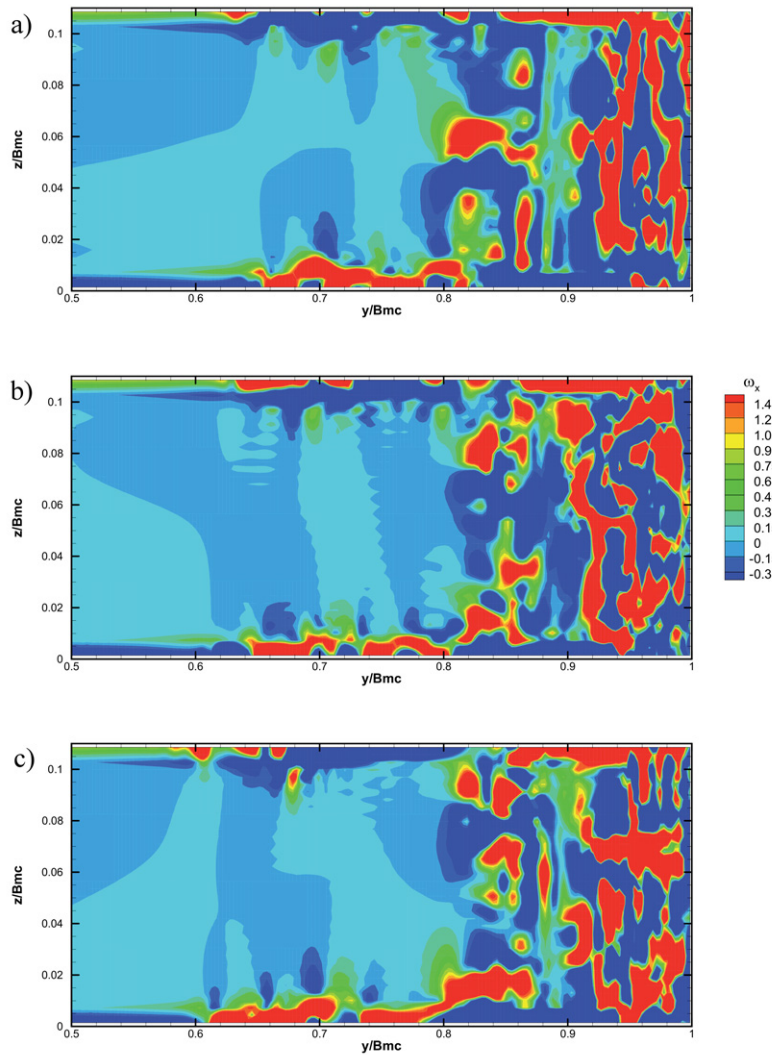


Figura 5.6: Vorticidade longitudinal instantânea adimensional na secção transversal $x/B_{MC} = 0.25$ para três instantes de tempo diferentes: a) $t = 0$ s; b) $t = 10$ s; c) $t = 20$ s.

(MI) e próximos da superfície livre e da parede para $0 < y/B_{MC} < 0.35$ (zona de recirculação). Como mencionado na Secção 2.1.5, esta elevada vorticidade próxima do leito pode levar ao desenvolvimento de uma zona de erosão. Contudo, uma vez que o leito foi rígido neste trabalho, não é possível estudar a sua deformação. Esta elevada vorticidade próxima do leito pode também significar a presença da célula helicoidal com o eixo de rotação na direção do escoamento descrita por Shakhbainia et al. (2010). Nesta secção ainda se identifica que os picos de $\bar{\omega}_x$ atingem valores máximos de $\bar{\omega}_x \approx 15$ e mínimos de $\bar{\omega}_x \approx -16$.

Assim, conclui-se que os picos de vorticidade próximos do leito podem levar ao desenvolvimento de uma zona de erosão na MI. Da análise conjunta das Figuras 5.6 e 5.7, também se pode observar que na zona de separação existem grandes

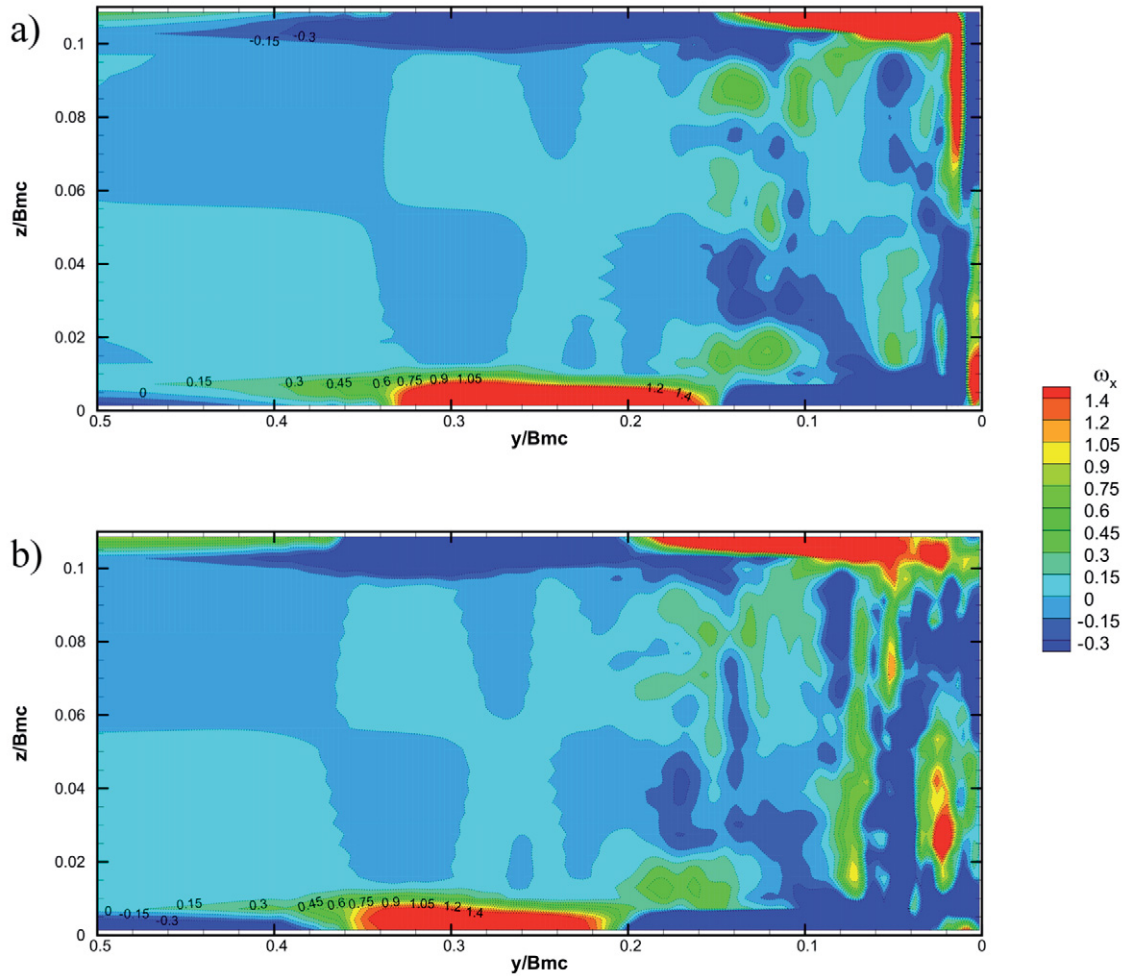


Figura 5.7: Vorticidade longitudinal média adimensional nas secções transversais: a) $x/B_{MC} = 0.16$; b) $x/B_{MC} = 0.25$.

variações na vorticidade longitudinal instantânea e picos de intensidade na vorticidade longitudinal média, o que pode significar também que existe presença de uma célula helicoidal com o eixo de rotação na direção do escoamento nesta zona.

5.5 Anisotropia do escoamento

Uma das formas menos comuns de estudar escoamentos fluviais é o uso do triângulo de Lumley. Esta técnica é baseada na análise dos invariantes do tensor de anisotropia, $-II$ e III . Na Figura 5.8 apresenta-se o Triângulo de Lumley, onde $-II$ representa o grau de anisotropia turbulenta e III representa a sua natureza (Mera et al., 2015).

Segundo Mera et al. (2015), os limites do triângulo de Lumley definem vários estados característicos de turbulência. A origem do gráfico ($-II = 0$, $III = 0$)

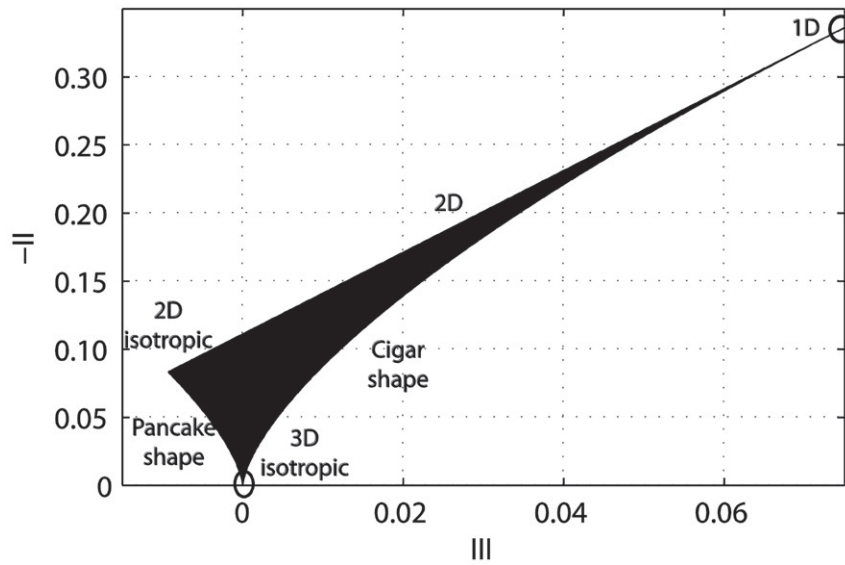


Figura 5.8: Triângulo de Lumley. Adaptado de Mera et al. (2015).

corresponde à turbulência isotrópica 3D, onde as tensões de corte longitudinal, transversal e vertical são iguais. A transição de turbulência 3D para 2D e/ou para 1D é delimitada por dois tipos de estruturas turbulentas: estruturas turbulentas com a forma de uma panqueca (*pancake shape*), correspondentes a uma situação onde duas das componentes da flutuação da velocidade são igualmente distribuídas e com uma amplitude consideravelmente maior que a terceira componente; e estruturas turbulentas com a forma de um cigarro (*cigar shape*), onde duas das componentes da flutuação de velocidade são semelhantes e a terceira componente tem uma amplitude substancialmente mais elevada. Estes dois tipos de estruturas turbulentas podem ser interpretados como estados de transição de turbulência. A estrutura semelhante à de uma panqueca quando a turbulência passa de 3D para 2D e a estrutura semelhante à de um cigarro quando a turbulência passa de 3D para 1D. A fronteira superior e vértice correspondem a turbulência 2D e 1D, respetivamente, e as áreas dentro dos limites mencionados representam as condições turbulentas gerais e tridimensionais. Qualquer estado de turbulência tem de estar dentro dos limites do triângulo de Lumley. Outra variável que avalia a anisotropia do escoamento é o parâmetro $J = 1 - 9(0.5II - III)$, que indica a presença de turbulência 2D quando $J = 0$ e de turbulência isotrópica 3D quando $J = 1$ (Mera et al., 2015).

Na Figura 5.9 apresenta-se a variável J , para $x/B_{MC} = -0.2, 0, 0.16, 0.25, 0.45$ e 1.

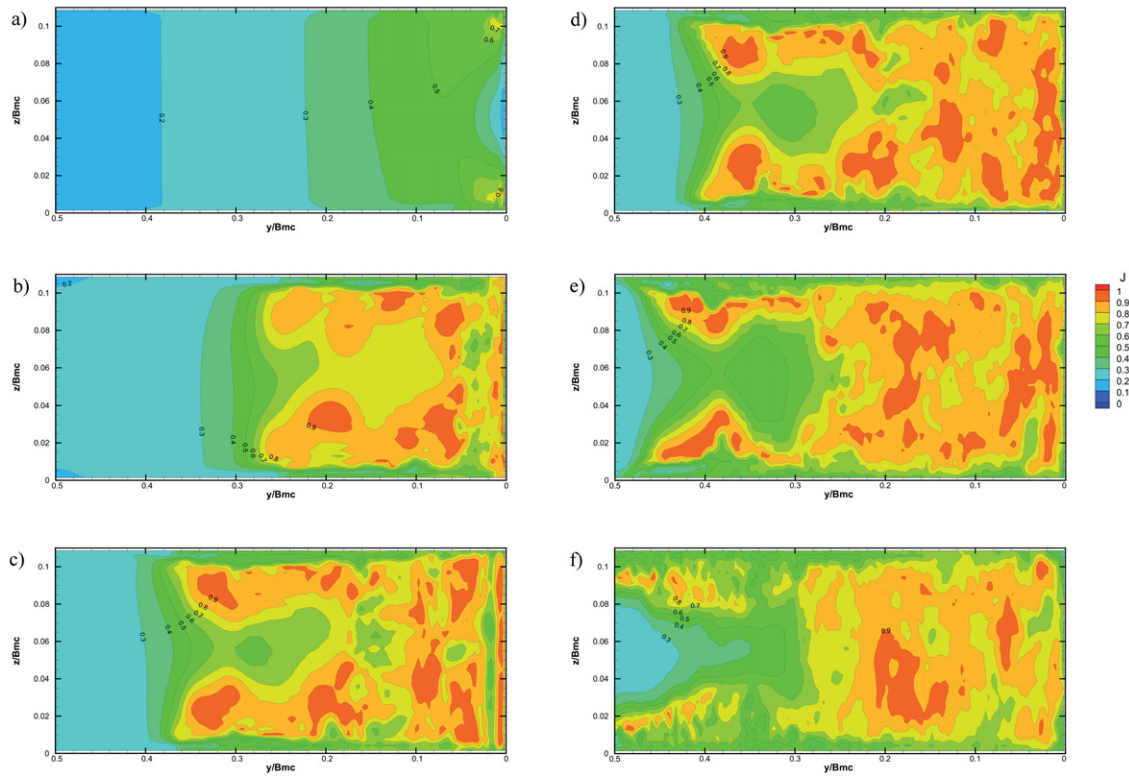


Figura 5.9: Parâmetro J em seis secções transversais: a) $x/B_{MC} = -0.2$; b) $x/B_{MC} = 0$; c) $x/B_{MC} = 0.16$; d) $x/B_{MC} = 0.25$; e) $x/B_{MC} = 0.45$; f) $x/B_{MC} = 1$.

Como referido em Mera et al. (2015), com o apoio da Figura 5.9, realiza-se uma análise superficial dos padrões da anisotropia turbulenta. Para as secções $x/B_{MC} > 0$ (Figura 5.9b a 5.9f) e para $0 > y/B_{MC} > 0.5$ nota-se que o escoamento é caracterizado por turbulência isotrópica, uma vez que $J > 0.5$ e, pode-se afirmar que existe uma elevada mistura dos escoamentos. Para valores de $y/B_{MC} > 0.5$, J vai tender para zero, o que mostra que a turbulência passa de isotrópica para 2D, uma vez que a componente transversal da velocidade diminuí consideravelmente e a componente longitudinal da velocidade aumenta. Como as velocidades próximas de superfícies sólidas e da parede tendem para zero, também J vai ter valores inferiores a 0.5 nessas zonas, como identificado na Figura 5.9.

Na Figura 5.9a observa-se a existência de alguns efeitos característicos do escoamento numa confluência. Contudo, estes efeitos são mínimos e encontram-se próximos de $y/B_{MC} \approx 0$, sendo assim grande parte dos valores de J inferiores a 0.5. Na secção transversal $x/B_{MC} = 1$ (Figura 5.9f), apesar de $J > 0.5$ em praticamente toda a secção, os seus valores máximos vão ser inferiores aos valores na secção $x/B_{MC} = 0.16$, $J \approx 0.97$ e $J \approx 1$, respetivamente. Este facto permite perceber que, apesar de existir turbulência 3D isotrópica em $x/B_{MC} = 1$, o escoamento começa a recuperar dos efeitos da confluência, uma vez que os valores máximos de J

começam a diminuir. Assim conclui-se que a turbulência isotrópica encontra-se principalmente presente na zona de separação do escoamento e na MI (Figura 5.9).

Na Figura 5.10 apresenta-se a distribuição dos invariantes de anisotropia para $x/B_{MC} = 0.16, 0.25, 0.45$ e 1 . Os invariantes presentes na Figura estão separados em três intervalos: azul $0 < z/H_{MC} < 0.33$; cor-de-laranja $0.33 < z/H_{MC} < 0.66$; amarelo $0.66 < z/H_{MC} < 1$.

Na Figura 5.10 identifica-se que todos os invariantes de anisotropia encontram-se dentro do triângulo de Lumley e, observa-se que a estrutura formada pela distribuição dos invariantes é semelhante à da Figura 5.8. Apesar de todos os invariantes distribuírem-se dentro do triângulo de Lumley em todas as secções transversais, existem algumas diferenças nas estruturas turbulentas. Numa primeira análise observa-se que apesar de ser possível identificar os três intervalos de alturas, o intervalo que domina a Figura 5.10 é para $0.66 < z/H_{MC} < 1$. Este intervalo corresponde à zona do escoamento mais próxima da superfície livre onde o escoamento é caracterizado por estruturas turbulentas que variam entre a turbulência 3D isotrópica até à turbulência 1D, passando por o estado de transição que corresponde, segundo Mera et al. (2015), a uma estrutura turbulenta com forma de cigarro. Para $0.33 < z/H_{MC} < 0.66$ observa-se que a distribuição da anisotropia turbulenta varia mais acentuadamente com a mudança de secção transversal, isto é, numa secção a estrutura turbulenta é semelhante a um cigarro e noutra secção é semelhante a uma panqueca. Por fim, no intervalo $0 < z/H_{MC} < 0.33$ observa-se que os resultados estão distribuídos ao longo de todo o triângulo e não apenas numa zona.

Na secção $x/B_{MC} = 0.16$ (Figura 5.10a) observa-se que, para $0 < z/H_{MC} < 0.33$, isto é, próximo do leito do MC, existe uma elevada concentração da distribuição dos invariantes junto ao vértice do triângulo correspondente a uma estrutura turbulenta isotrópica 2D. Contudo, os invariantes estão distribuídos ao longo de todo o triângulo. Para $0.33 < z/H_{MC} < 0.66$, identifica-se que apesar dos invariantes seguirem uma distribuição constante ao longo do triângulo, encontram-se mais próximos da zona onde a estrutura turbulenta tem a forma de um cigarro e, com o apoio da Figura 5.9c, conclui-se que apesar de não existir praticamente turbulência isotrópica 3D, esta zona é caracterizada por um estado de transição. Para $0.66 < z/H_{MC} < 1$, a turbulência próxima de $y/B_{MC} \approx 0$ é 3D isotrópica, mas à medida que y/B_{MC} aumenta, entra num estado de transição (com a estrutura semelhante a um cigarro) que leva à turbulência 1D.

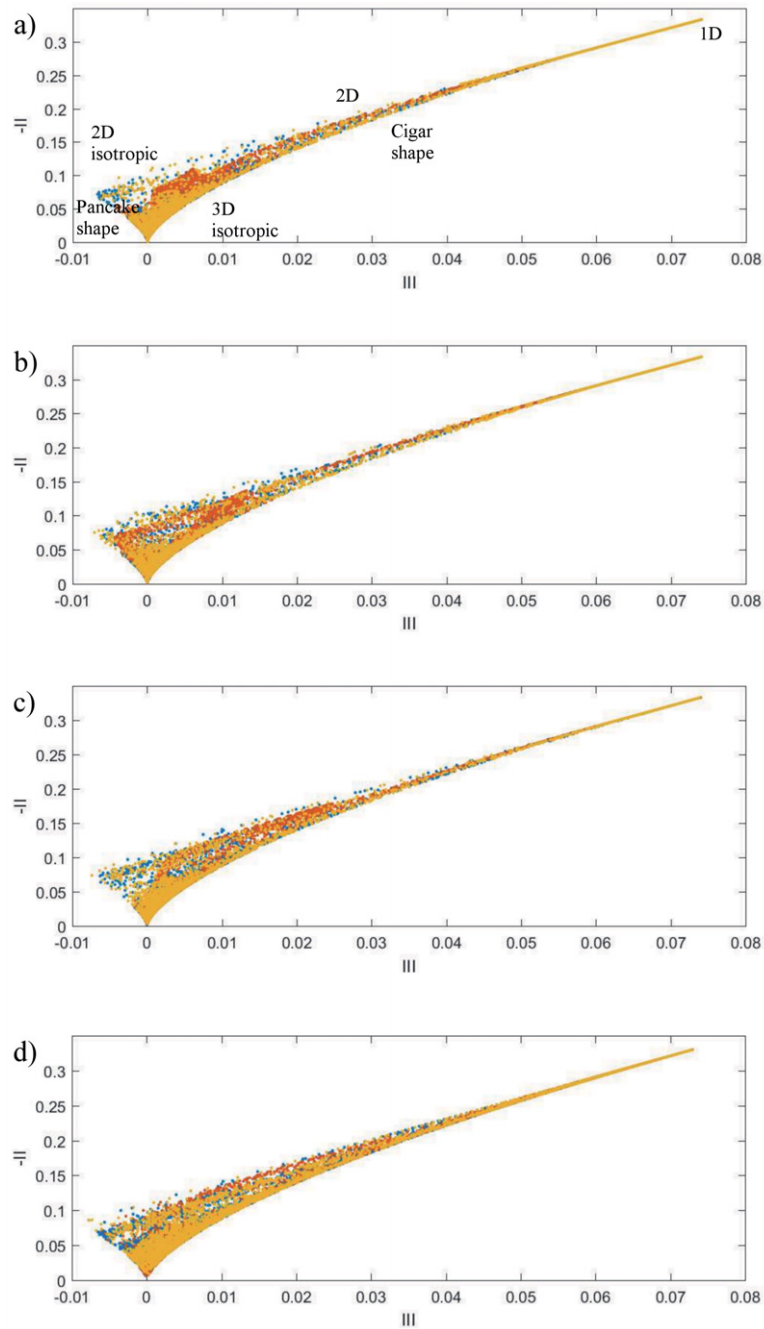


Figura 5.10: Distribuição dos invariantes de anisotropia nas secções transversais: a) $x/B_{MC} = 0.16$; b) $x/B_{MC} = 0.25$; c) $x/B_{MC} = 0.45$; d) $x/B_{MC} = 1.00$. Azul corresponde a $0 < z/H_{MC} < 0.33$, cor-de-laranja para $0.33 < z/H_{MC} < 0.66$ e amarelo para $0.66 < z/H_{MC} < 1$.

Na secção $x/B_{MC} = 0.25$ (Figura 5.10b) observa-se que para $0 < z/H_{MC} < 0.33$ os invariantes estão distribuídos junto ao vértice do triângulo correspondente a uma estrutura turbulenta isotrópica 2D. Para $0.33 < z/H_{MC} < 0.66$, existe um aumento na concentração dos invariantes próximo do vértice correspondente uma estrutura turbulenta isotrópica 2D. Para $0.66 < z/H_{MC} < 1$, nota-se um ligeiro

aumento na concentração dos invariantes próximo do vértice correspondente a turbulência isotrópica 2D.

Na secção $x/B_{MC} = 0.45$ (Figura 5.10c) observa-se que, para $0 < z/H_{MC} < 0.33$ existe um ligeiro aumento da concentração dos invariantes junto ao vértice correspondente a uma estrutura turbulenta isotrópica 2D. Para $0.33 < z/H_{MC} < 0.66$, a distribuição da anisotropia deslocou-se para a zona de transição, estando próximo do limite que diz respeito à estrutura turbulenta com forma de um cigarro. No intervalo $0.66 < z/H_{MC} < 1$ existe um aumento da concentração dos invariantes junto do limite que representa a turbulência 2D.

Na secção $x/B_{MC} = 1$ (Figura 5.10d), no intervalo $0 < z/H_{MC} < 0.33$ identifica-se um aumento da concentração dos invariantes na zona de transição correspondente à estrutura turbulenta com a forma de uma panqueca e no vértice que diz respeito a uma turbulência isotrópica 2D. Para $0.33 < z/H_{MC} < 0.66$, observa-se um aumento da concentração dos invariantes no vértice que diz respeito a uma turbulência isotrópica 3D e no limite correspondente a turbulência 2D. Por fim, para $0.66 < z/H_{MC} < 1$, ocorre uma ligeira redução na concentração dos invariantes junto da origem e, identifica-se um ligeiro aumento na concentração próxima da turbulência 2D e na zona de transição correspondente a uma estrutura turbulenta com a forma de um cigarro.

Na análise conjunta das Figuras 5.9 e 5.10, conclui-se que apesar de existir uma grande variação na distribuição dos invariantes ao longo do escoamento, para $y/B_{MC} > 0.5$ a estrutura turbulenta é principalmente 1D, uma vez que apenas a componente longitudinal da velocidade é superior a 0. Contudo, para $y/B_{MC} < 0.5$ o escoamento é caracterizado por turbulência isotrópica 3D e nas zonas próximas do leito, a turbulência encontra-se nos estados de transição (3D para 2D).

Na zona de separação pode concluir-se que a estrutura turbulenta é maioritariamente 3D e, à medida que se avança para o centro do canal a concentração dos invariantes vai estar em ambas as zonas de transição. Contudo, na MI observa-se que próximo do leito e da superfície livre as estruturas turbulentas são isotrópicas 3D (como se observa nas Figuras 4.9c e d para $0.3 < y/B_{MC} < 0.4$).

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado e ainda sugestões para futuros estudos.

6.1 Conclusões

O objetivo principal desta dissertação foi aplicar e validar o modelo LES no estudo numérico do escoamento turbulento numa confluência fluvial. Para alcançar este objetivo, aplicou-se um caso de estudo com base nos ensaios experimentais efetuados por Birjukova et al. (2014) numa confluência com ângulo de 70°. Na fase inicial deste trabalho foi efetuada uma simulação 3D com uma malha grosseira com o solver *interFOAM* com objetivo de estudar a superfície livre através do método VOF. Com esta malha grosseira os resultados numéricos obtidos foram os esperados, o que transmitiu confiança para se refinar mais a malha. Assim, realizou-se uma simulação semelhante à anterior, mas com uma malha mais refinada. Contudo, concluiu-se que com uma malha muito refinada e com o método VOF o esforço computacional seria muito elevado e não permitiria tirar conclusões aprofundadas no tempo disponível para a realização desta dissertação. Foi então necessário abdicar da simulação da superfície livre. Assim, optou-se por utilizar o solver *PisoFOAM*, que apesar de não possibilitar o uso do método VOF foi considerado o solver adequado para simular escoamentos incompressíveis e turbulentos. Portanto, os resultados obtidos embora não simulem a superfície livre, permitem estudar com boa precisão o escoamento numa confluência.

O tratamento e a análise dos resultados obtidos em OpenFOAM foi feita através de códigos desenvolvidos em Matlab. Foram desenvolvidos quatro códigos principais. Estes códigos encontram-se divididos em resultados instantâneos e resultados médios. Este método permite reduzir o esforço computacional. Para validar o modelo LES compararam-se os resultados numéricos médios com os experimentais. Os resultados da simulação numérica apresentaram boa concordância com os dados experimentais. Contudo, os resultados numéricos apresentaram algumas diferenças relativamente aos experimentais. Estas diferenças, podem ser atribuídas a diversos fatores como por exemplo: o facto do modelo LES não ter capacidade para capturar todas as características físicas presentes na zona de separação, aos erros nas medições experimentais ou mesmo à malha do Vettore ser demasiado grosseira. No entanto, nos resultados numéricos foi possível observar-se todas as principais características do escoamento numa confluência (Secção 2.1). Concluiu-se que de modo geral os resultados numéricos transmitem confiança suficiente para simular escoamento 3D em confluências.

Validado o modelo numérico procedeu-se à análise mais aprofundada do escoamento, onde foram estudados diversos parâmetros. Inicialmente concluiu-se que o modelo RANS pode não ser adequado para este estudo, uma vez que apenas consegue simular com pouca precisão o escoamento médio. Assim, apesar de o trabalho computacional exigido pelo modelo LES ser superior ao do modelo RANS, para caracterizar e analisar os efeitos do escoamento instantâneo na estrutura turbulenta é necessário utilizar o modelo LES. Foi possível verificar que a MI e a zona de separação são as zonas do escoamento que têm maior importância no estudo de confluências.

Na MI observou-se um aumento considerável das componentes longitudinais e transversais das intensidades turbulentas. No estudo da estabilidade adimensional, conclui-se que a MI vai ser altamente instável e pode levar à geração de vórtices verticais. Estes resultados em conjunto com os resultados obtidos no estudo das vorticidades permitiram afirmar que as instabilidades referidas (no estudo da estabilidade adimensional) têm padrões semelhantes aos das instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Pelo que se pode concluir que a MI deve a sua formação às instabilidades de Kelvin-Helmholtz. No estudo da vorticidade também foi possível visualizar uma zona de elevada vorticidade longitudinal próxima do leito, que pode ser a causa da zona de erosão descrita em vários estudos anteriores. Através do estudo da anisotropia do escoamento é possível afirmar-se que a MI é caracterizada, próxima do leito e da superfície livre por estruturas turbulentas quase isotrópicas 3D, enquanto que para $z/H_{MC} \approx 0.5$ as estruturas turbulentas vão ser praticamente 2D.

Por fim, na zona de recirculação observou-se um ligeiro aumento em ambas as componentes das instabilidades turbulentas. Também, no estudo da anisotropia do escoamento identificou-se que esta zona é majoritariamente dominada por turbulência isotrópica 3D. Assim, em conjunto com os resultados de ambas as vorticidades (identifica-se que a vorticidade instantânea, tanto vertical como longitudinal, na zona de recirculação está sempre a variar e é caracterizada por picos de intensidade muito altos e muito baixos). Conclui-se que na zona de recirculação o escoamento é dominado por elevada turbulência que promove uma mistura forte dos escoamentos.

6.2 Trabalhos futuros

De forma a dar continuidade ao trabalho realizado, seria de interesse estudar a sua influência do ângulo de confluência no desenvolvimento do escoamento. Seria também de interesse considerar a superfície livre e os fenómenos responsáveis pela sua alteração, usando-se o método VOF e o solver *interFOAM*.

Uma vez que o estudo realizado focou-se apenas num canal rígido, seria de interesse estudar o efeito da erosão no leito do canal. Verificar se a alteração na morfologia do canal pode afetar o desenvolvimento da estrutura do escoamento.

Outro estudo que poderia ser realizado seria a simulação de uma confluência de canais com profundidades diferentes.

BIBLIOGRAFIA

- Ashmore, P. E., Ferguson, R. I., Prestegard, K. L., Ashworth, P. J. e Paola, C. (1992). "Secondary flow in anabranch confluences of a braided, gravel-bed stream". *Earth Surface Processes and Landforms* 17.3, pp. 299–311. DOI: 10.1002/esp.3290170308.
- Baranya, S., Olsen, N. R. B. e Józsa, J. (2013). "Flow Analysis of a River Confluence with Field Measurements and Rans Model with Nested Grid Approach". *River Research and Applications* 31.1, pp. 28–41. DOI: 10.1002/rra.2718.
- Best, J. L. (1987). "Flow Dynamics At River Channel Confluences: Implications For Sediment Transport And Bed Morphology". *Recent Developments in Fluvial Sedimentology*, pp. 27–35. DOI: 10.2110/pec.87.39.0027.
- Best, J. L. (1988). "Sediment transport and bed morphology at river channel confluences". *Sedimentology* 35.3, pp. 481–498. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1988.tb00999.x.
- Best, J. L. e Reid, I. (1984). "Separation Zone at Open-Channel Junctions". *Journal of Hydraulic Engineering* 110.11, pp. 1588–1594. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:11(1588).
- Best, J. L. e Roy, A. G. (1991). "Mixing-layer distortion at the confluence of channels of different depth". *Nature* 350.6317, pp. 411–413. DOI: 10.1038/350411a0.
- Birjukova, O., Guillen, S., Alegria, F. e Cardoso, A. (2014). "Three dimensional flow field at confluent fixed-bed open channels". *River Flow 2014*. (CRC) Press, pp. 1007–1014. DOI: 10.1201/b17133-136.
- Biron, P., Roy, A. e Best, J. (1996a). "Turbulent flow structure at concordant and discordant open-channel confluences". *Experiments in Fluids* 21.6. DOI: 10.1007/BF00189046.
- Biron, P., Roy, A. G., Best, J. L. e Boyer, C. J. (1993). "Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels". *Geomorphology* 8.2-3, pp. 115–129. DOI: 10.1016/0169-555X(93)90032-W.

- Biron, P., Best, J. L. e Roy, A. G. (1996b). "Effects of Bed Discordance on Flow Dynamics at Open Channel Confluences". *Journal of Hydraulic Engineering* 122.12, pp. 676–682. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:12(676).
- Biron, P. M., Richer, A., Kirkbride, A. D., Roy, A. G. e Han, S. (2002). "Spatial patterns of water surface topography at a river confluence". *Earth Surface Processes and Landforms* 27.9, pp. 913–928. DOI: 10.1002/esp.359.
- Biron, P. M., Ramamurthy, A. S. e Han, S. (2004). "Three-Dimensional Numerical Modeling of Mixing at River Confluences". *Journal of Hydraulic Engineering* 130.3, pp. 243–253. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:3(243).
- Bradbrook, K. F., Biron, P. M., Lane, S. N., Richards, K. S. e Roy, A. G. (1998). "Investigation of controls on secondary circulation in a simple confluence geometry using a three-dimensional numerical model". *Hydrological Processes* 12.8, pp. 1371–1396. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19980630)12:8<1371::AID-HYP620>3.0.CO;2-C.
- Bradbrook, K. F., Lane, S. N. e Richards, K. S. (2000a). "Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences". *Water Resources Research* 36.9, pp. 2731–2746. DOI: 10.1029/2000WR900011.
- Bradbrook, K. F., Lane, S. N., Richards, K. S., Biron, P. M. e Roy, A. G. (2001). "Role of Bed Discordance at Asymmetrical River Confluences". *Journal of Hydraulic Engineering* 127.5, pp. 351–368. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:5(351).
- Bradbrook, K., Lane, S., Richards, K., Biron, P. e Roy, A. (2000b). "Large Eddy Simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences". *Journal of Hydraulic Research* 38.3, pp. 207–215. DOI: 10.1080/00221680009498338.
- Brito, M., Baeta, G., Canelas, O. B. e Gil, L. (2017). "Large Eddy Simulation of turbulent flow at open-channel confluences". *CIBEM 2017*.
- Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., Sukhodolov, A. e Kirkil, G. (2011). "Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: Insight provided by an eddy-resolving numerical simulation". *Water Resources Research* 47.5. DOI: 10.1029/2010WR010018.
- Constantinescu, G. S., Krajewski, W. F., Ozdemir, C. E. e Tokyay, T. (2007). "Simulation of airflow around rain gauges: Comparison of LES with RANS models". *Advances in Water Resources* 30.1, pp. 43–58. DOI: 10.1016/j.adwatres.2006.02.011.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. e Cabot, W. H. (1991). "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model". *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* 3.7, pp. 1760–1765. DOI: 10.1063/1.857955.

- Guillén, S. (2015). “Hydro-morphodynamics of open-channel confluences with low discharge ratio and dominant tributary sediment supply”. Tese de doutoramento. Instituto Superior Técnico.
- Hoohlo, C. (1994). “A Numerical and Experimental Study of Open-Channel Flow in a Pipe of Circular Cross-Section With a Flat Bed”. Tese de doutoramento. University of Newcastle.
- Huang, J., Weber, L. J. e Lai, Y. G. (2002). “Three-Dimensional Numerical Study of Flows in Open-Channel Junctions”. *Journal of Hydraulic Engineering* 128.3, pp. 268–280. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:3(268).
- Lane, S. N., Bradbrook, K. F., Richards, K. S., Biron, P. M. e Roy, A. G. (2000). “Secondary circulation cells in river channel confluences: measurement artefacts or coherent flow structures?” *Hydrological Processes* 14.11-12, pp. 2047–2071. DOI: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<2047::AID-HYP54>3.0.CO;2-4.
- Lane, S., Bradbrook, K., Richards, K., Biron, P. e Roy, A. (1999). “The application of computational fluid dynamics to natural river channels: three-dimensional versus two-dimensional approaches”. *Geomorphology* 29.1-2, pp. 1–20. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00003-3.
- Matsuoka, C. (2014). “Kelvin-Helmholtz Instability and Roll-up”. *Scholarpedia* 9.3, p. 11821. DOI: 10.4249/scholarpedia.11821.
- Mera, I., Franca, M., Anta, J. e Peña, E. (2015). “Turbulence anisotropy in a compound meandering channel with different submergence conditions”. *Advances in Water Resources* 81, pp. 142–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.10.012>.
- Mosley, M. P. (1976). “An experimental study of channel confluences”. *Journal of Geology*.
- Rhoads, B. L. e Kenworthy, S. T. (1995). “Flow structure at an asymmetrical stream confluence”. *Geomorphology* 11.4, pp. 273–293. DOI: 10.1016/0169-555X(94)00069-4.
- Rhoads, B. L. e Sukhodolov, A. N. (2001). “Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. Thermal mixing and time-averaged velocities”. *Water Resources Research* 37.9, pp. 2393–2410. DOI: 10.1029/2001WR000316.
- Rhoads, B. L. e Sukhodolov, A. N. (2004). “Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence”. *Water Resources Research* 40.6. DOI: 10.1029/2003WR002811.

- Rhoads, B. L. e Sukhodolov, A. N. (2008). “Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface”. *Water Resources Research* 44.8, n/a–n/a. DOI: 10.1029/2007WR006634.
- Roy, A. G. e Bergeron, N. (1990). “Flow and particle paths at a natural river confluence with coarse bed material”. *Geomorphology* 3.2, pp. 99–112. DOI: 10.1016/0169-555X(90)90039-S.
- Shakibainia, A., Tabatabai, M. R. M. e Zarrati, A. R. (2010). “Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences”. *Canadian Journal of Civil Engineering* 37.5, pp. 772–781. DOI: 10.1139/L10-016.
- Stephen Rice, A. R. e Rhoads, B. L. (2008). *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*. Ed. por L. John Wiley & Sons. 1ª ed. Wiley.
- Versteeg, H. K. e Malalasekera, W (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Ed. por P. Hall. Prentice Hall.
- Weber, L. J., Schumate, E. D. e Mawer, N. (2001). “Experiments on Flow at a 90° Open-Channel Junction”. *Journal of Hydraulic Engineering* 127.5, pp. 340–350. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:5(340).
- Weerakoon, S. (1989). “Three-dimensional calculation of flow in river confluences using boundary-fitted coordinates”. *Journal of hydroscience and hydraulic engineering* 7, pp. 51–62.
- White, F. (2011). *Fluid Mechanics*. Ed. por McGraw-Hill. McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw Hill. ISBN: 9780073529349.
- Zhiyin, Y. (2015). “Large-eddy simulation: Past, present and the future”. *Chinese Journal of Aeronautics* 28.1, pp. 11–24. DOI: 10.1016/j.cja.2014.12.007.

A N E X O



ÁRVORE DE DIRETORIAS DO CASO DE
ESTUDO DO OPENFOAM

ANEXO I. ÁRVORE DE DIRETORIAS DO CASO DE ESTUDO DO OPENFOAM

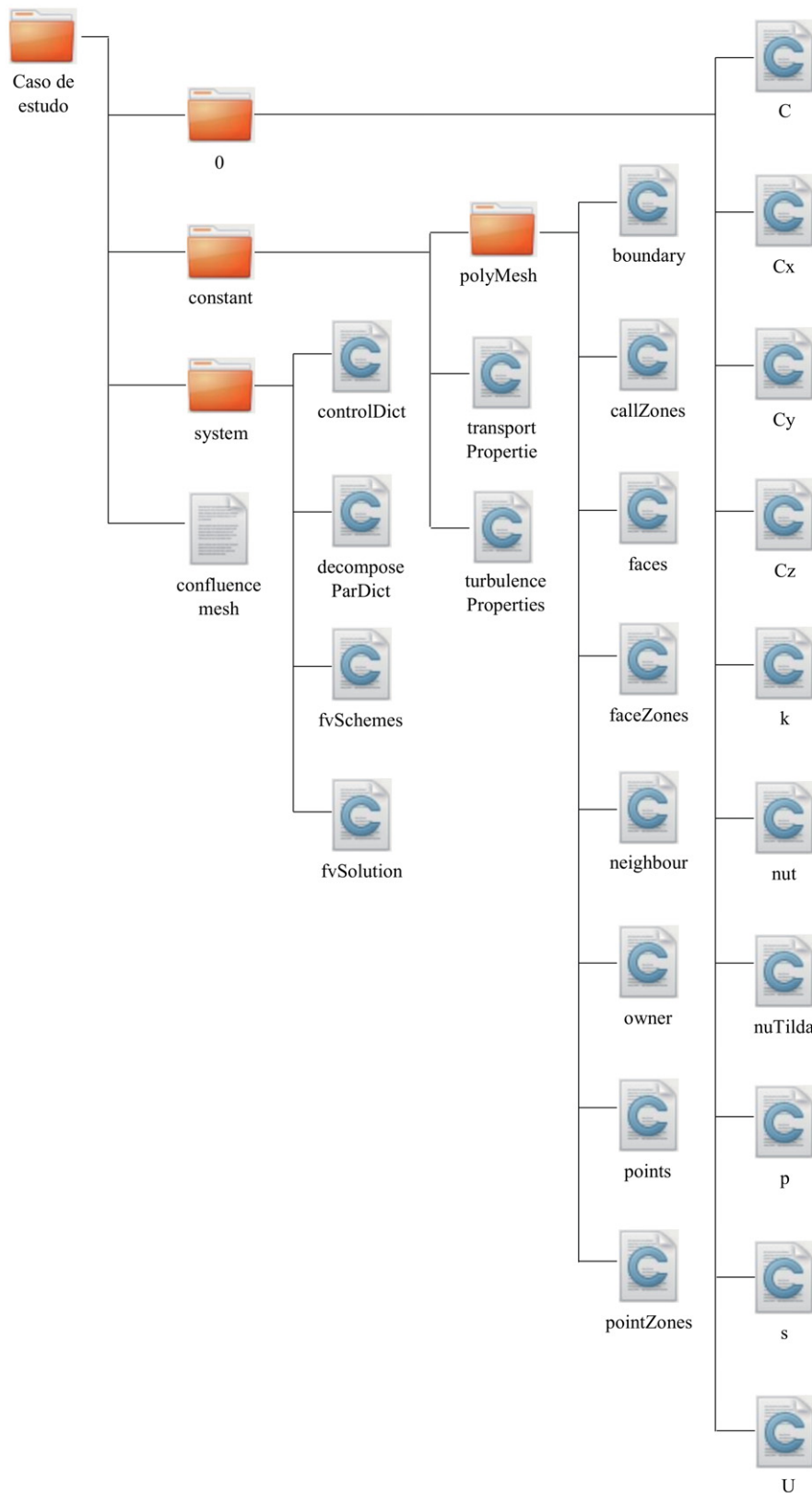


Figura I.1: Diagrama de diretórias em árvore que representa o conjunto de pastas e ficheiros usados pelo OpenFOAM para correr a simulação final.

A N E X O



**CÓDIGO PARA ORGANIZAR A BASE DE
DADOS DOS VALORES MÉDIOS**

ANEXO II. CÓDIGO PARA ORGANIZAR A BASE DE DADOS DOS VALORES MÉDIOS

```
1 % This function creates a database with the mean velocity and mean pressure values,
2 % organized by cross-section
3
4 function [Basedados_valores_medios] = main_database_mean(U_tr,P)
5 %% Converts the instant velocities in mean velocities
6     f = length(U_tr(1).U);
7
8     UVW_mean = zeros(f,3);
9
10    format long g
11
12    P_in_mean = zeros(f,1);
13
14    for s = 1 : f;
15
16        for i = 1 : length(U_tr);
17            x(i,:) = U_tr(i).U(s,:);
18
19            p(i,:) = P(i).p(s,:);
20
21        end
22
23        UVW_mean(s,:) = mean(x);
24
25        P_in_mean(s,:) = mean(p);
26
27        % Kg / (m s^2)
28
29    end
30
31
32    %% Loads the cells file
33    Cells = load('Cell');
34    Cell = Cells.Cell;
35
36    %% removes the TC values
37    b = find(Cell(:,2) < 0);
38
39    Cell(b,:) = [];
40    UVW_mean(b,:) = [];
41    P_in_mean(b,:) = [];
42
43    %% Organizes all the files with the positions in the channel
44    x = unique(Cell(:,1));
45    leng = length(x);
46    for i = 1 : leng
47
48        %% Finding the Height values
49        X = find(Cell(:,1) == x(i));
50
51        %% Separates the X value from Y and Z
52        Px(:,1) = Cell(X,1);
53        Px(:,2) = Cell(X,2);
54        Px(:,3) = Cell(X,3);
55
56        Ux(:,1) = UVW_mean(X,1);
57        Ux(:,2) = UVW_mean(X,2);
58        Ux(:,3) = UVW_mean(X,3);
59
60        Prex(:,1) = P_in_mean(X,1);
61
62        %% Find unique X values
63        Py(:,1) = unique(Px(:,2));
64
65        %% Finding the desired X values
66        for l = 1 : length(Py)
67
68            small = find(Px(:,2) == Py(l));
```

Figura II.1: Parte 1 do código usado para organizar numa base de dados os valores médios.

```

70         J(:,1) = Px(small,1);
71         J(:,2) = Px(small,2);
72         J(:,3) = Px(small,3);
73
74         [B,I] = sort(J(:,3),'ascend');
75
76         J(:,3) = B;
77
78         Point(:,1) = J(:,1);
79         Point(:,2) = J(:,2);
80         Point(:,3) = J(:,3);
81
82         W(:,1) = Ux(small,1);
83         W(:,2) = Ux(small,2);
84         W(:,3) = Ux(small,3);
85
86         PP(:,1) = Prex(small,1);
87
88         Vel(:,1) = W(I,1);
89         Vel(:,2) = W(I,2);
90         Vel(:,3) = W(I,3);
91
92         Press(:,1) = PP(I,1);
93
94         %% creates three matrix, xyz, velocity and pressure. Separated by cross
95         section
96         q = length(B);
97         for j = 1 : q
98
99             xyz_1{1,j} = [Point(j,1) Point(j,2) Point(j,3)];
100
101             UVW_meanf{1,j} = [Vel(j,1) Vel(j,2) Vel(j,3)];
102
103             P_meanf{1,j} = Press(j,1);
104
105         end
106
107     end
108
109     n = size(xyz_1,1);
110
111     m = size(xyz_1,2);
112
113     U_temporal1 = zeros(n,m);
114     V_temporal1 = zeros(n,m);
115     W_temporal1 = zeros(n,m);
116     P_temporal1 = zeros(n,m);
117
118     %% Organizes velocities in different files
119     for ii = 1 : n;
120
121         for jj = 1 : m;
122
123             U_temporal1(ii,jj) = UVW_meanf{ii,jj}(1,1);
124
125             V_temporal1(ii,jj) = UVW_meanf{ii,jj}(1,2);
126
127             W_temporal1(ii,jj) = UVW_meanf{ii,jj}(1,3);
128
129             P_temporal1(ii,jj) = P_meanf{ii,jj}(1,1);
130
131         end
132     end
133
134     %% Flip the matrix columns
135     U_temporal(i).xyz = flipud(U_temporal1);
136     V_temporal(i).xyz = flipud(V_temporal1);
137     W_temporal(i).xyz = flipud(W_temporal1);

```

Figura II.2: Parte 2 do código usado para organizar numa base de dados os valores médios.

ANEXO II. CÓDIGO USADO PARA ORGANIZAR NUMA BASE DE DADOS OS VALORES MÉDIOS

```
138         P_temporal(i).xyz = flipud(P_temporal1);
139
140         xyz(i).xyz = xyz_1;
141     end
142
143     Basedados_valores_medios.xyz = xyz;
144     Basedados_valores_medios.U_temporal = U_temporal;
145     Basedados_valores_medios.V_temporal = V_temporal;
146     Basedados_valores_medios.W_temporal = W_temporal;
147     Basedados_valores_medios.P_temporal = P_temporal;
148     Basedados_valores_medios.Cell = Cell;
149
150     save('Basedados_valores_medios','Basedados_valores_medios','-v7.3')
151
152 end
```

Figura II.3: Parte 3 do código usado para organizar numa base de dados os valores médios.

A N E X O



**CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA
BASE DE DADOS DOS VALORES MÉDIOS**

ANEXO III. CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA BASE DE DADOS DOS VALORES MÉDIOS

```

1  % This function calculates multiple parameters using the mean values, you
2  % only have to choose which section (Long, Cros, Vert) and which value of x, y or z
3  % depending on the section
4
5  function
6  [X,Y,Z,U_temporal,V_temporal,W_temporal,U_xy,U_yz,U_xz,xyz,P_temporal,Wm_x,Wm_y,Wm_z,Sml,
7  SW] = main_mean_values(section,Basedados_valores_medios)
8  %% Select the right section
9  if section == 'Cros'
10     %% selects which crosssection and extracts it's values
11     prompt = 'Which x position? ';
12     x = input(prompt);
13
14     X = unique(Basedados_valores_medios.Cell(:,1));
15     x_value = find(X == x);
16
17     xyz = Basedados_valores_medios.xyz(x_value).xyz;
18     U_temporal = Basedados_valores_medios.U_temporal(x_value).xyz;
19     V_temporal = Basedados_valores_medios.V_temporal(x_value).xyz;
20     W_temporal = Basedados_valores_medios.W_temporal(x_value).xyz;
21     P_temporal = Basedados_valores_medios.P_temporal(x_value).xyz;
22
23     %% Create X and Y vectors to tecplot read
24     Y_l = size(xyz,1);
25
26     for i = 1:Y_l
27         Y(i) = xyz{i,1}(1,2);
28     end
29
30     Z_l = size(xyz,2);
31
32     for i = 1:Z_l
33         Z(i) = xyz{1,i}(1,3);
34     end
35
36     %% calculates the U_xy, U_yz and U_xz
37     %U=Q/A
38     %Q=0.044m^3/s
39     %A=1*0.175 = L * h
40     h = 0.11; %change this to your max height value
41     U = 0.044 ./ h; %change this to your discharge value
42
43     U_xy = sqrt((U_temporal ./ U).^2 + (V_temporal ./ U).^2);
44     U_yz = sqrt((V_temporal ./ U).^2 + (W_temporal ./ U).^2);
45     U_xz = sqrt((U_temporal ./ U).^2 + (W_temporal ./ U).^2);
46
47     %% calculates the mean vorticity
48     [WZ,WY] = gradient(W_temporal,Z,Y);
49     [VZ,VY] = gradient(V_temporal,Z,Y);
50
51     Wm_x = (WY - VZ) * (h ./ U);
52     Wm_y = 'Different section';
53     Wm_z = 'Different section';
54
55     %% calculates SW
56     D = 0.04; %m aproximatly stagnation zone width
57     h = 0.175; %m flow depth
58     alpha = 8.1; % from the article Sukhodolov 2008
59     ks = 2 * 0.007; % Olga uses d(65) = 7 mm to calculate the Ks
60
61     cf = (alpha .* (h ./ ks) .^(1/6)) .^(-2);
62     SW = cf .* (D ./ h);
63     clear a b
64
65     %% Calculates Sml

```

Figura III.1: Parte 1 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores médios.

```

68     a = max(U_temporal);
69     b = min(U_temporal);
70
71     U1 = max(a);
72     U2 = min(b);
73
74     Uc = (U1 + U2) ./ 2;
75     VU = (U1 - U2);
76
77     t = size(U_temporal,2);
78     for i = 1:t
79
80         a = U_temporal(:,i);
81
82         dx = a(2:end) - a(1:end-1);
83         dt = Y(2:end) - Y(1:end-1);
84
85         dt = dt';
86
87         vder = dx ./ dt;
88         der_U(i,:) = max(vder);
89
90         clear a dx dt vder
91
92     end
93
94     der_uf = max(der_U);
95     lambda = (VU) ./ (der_uf);
96
97     Sml = cf .* (lambda ./ h) .* (Uc ./ VU);
98
99     U_temporal = U_temporal ./ U;
100    V_temporal = V_temporal ./ U;
101    W_temporal = W_temporal ./ U;
102
103    %% select another section, but uses the code in order to calculate the same
104    %% variables
105    elseif section == 'Long'
106    %% selects which long section and extracts it's values
107    prompt = 'Which z position? ';
108    z = input(prompt);
109
110    Z = unique(Basedados_valores_medios.Cell(:,3));
111    z_value = find(Z == z);
112
113    leng1 = length(Basedados_valores_medios.xyz);
114    for i = 1 : leng1
115
116        leng2 = length(Basedados_valores_medios.xyz(1).xyz);
117        for j = 1 : leng2
118
119            xyz{i,j} = Basedados_valores_medios.xyz(i).xyz{j,z_value};
120            U_temporal(i,j) = Basedados_valores_medios.U_temporal(i).xyz{j,z_value};
121            V_temporal(i,j) = Basedados_valores_medios.V_temporal(i).xyz{j,z_value};
122            W_temporal(i,j) = Basedados_valores_medios.W_temporal(i).xyz{j,z_value};
123            P_temporal(i,j) = Basedados_valores_medios.P_temporal(i).xyz{j,z_value};
124        end
125    end
126
127    U_temporal = fliplr(U_temporal);
128    V_temporal = fliplr(V_temporal);
129    W_temporal = fliplr(W_temporal);
130    P_temporal = fliplr(P_temporal);
131
132    %% Create X and Y vectors to tecplot read
133    X_l = size(xyz,1);
134    for i = 1:X_l
135
136        X(i) = xyz{i,1}(1,1);

```

Figura III.2: Parte 2 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores médios.

ANEXO III. CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA BASE DE DADOS DOS VALORES MÉDIOS

```

136     end
137
138     Y_l = size(xyz,2);
139     for i = 1:Y_l
140
141         Y(i) = xyz{1,i}(1,2);
142     end
143
144     %% calculates the U_xy, U_yz and U_xz
145     %U=Q/A
146     %Q=0.044m^3/s
147     %A=1*0.175 = L * h
148     h = 0.11; %change this to your max height value
149     U = 0.044 ./ h;
150
151     U_xy = sqrt((U_temporal ./ U).^2+(V_temporal ./ U).^2);
152     U_yz = sqrt((V_temporal ./ U).^2+(W_temporal ./ U).^2);
153     U_xz = sqrt((U_temporal ./ U).^2+(W_temporal ./ U).^2);
154
155     %% Calculates the mean vorticity
156     [UY,UX] = gradient(U_temporal,Y,X);
157     [VY,VX] = gradient(V_temporal,Y,X);
158
159     Wm_z = (VX - UY) * (h ./ U);
160     Wm_y = 'Different section';
161     Wm_x = 'Different section';
162
163     U_temporal = U_temporal ./ U;
164     V_temporal = V_temporal ./ U;
165     W_temporal = W_temporal ./ U;
166
167     %% corrects the X positions
168     clear a
169
170     a = X - 0.7015000000000000;
171     X = a;
172
173     %%
174     Sml = 0;
175     SW = 0;
176
177     %% select the last section
178     elseif section == 'Vert'
179         prompt = 'Which y position? ';
180         y = input(prompt);
181
182         Y = unique(Basedados_valores_medios.Cell(:,2));
183         y_value = find(Y == y);
184
185         leng1 = length(Basedados_valores_medios.xyz);
186         for i = 1 : leng1
187
188             leng2 = size(Basedados_valores_medios.xyz(1).xyz,2);
189             for j = 1 : leng2
190
191                 xyz{i,j} = Basedados_valores_medios.xyz(i).xyz{y_value,j};
192                 U_temporal(i,j) = Basedados_valores_medios.U_temporal(i).xyz(y_value,j);
193                 V_temporal(i,j) = Basedados_valores_medios.V_temporal(i).xyz(y_value,j);
194                 W_temporal(i,j) = Basedados_valores_medios.W_temporal(i).xyz(y_value,j);
195                 P_temporal(i,j) = Basedados_valores_medios.P_temporal(i).xyz(y_value,j);
196             end
197         end
198
199     %% Create X and Y vectors to tecplot read
200     X_l = size(xyz,1);
201     for i = 1:X_l
202
203         X(i) = xyz{i,1}(1,1);
204     end

```

Figura III.3: Parte 3 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores médios.

```

205
206     Z_l = size(xyz,2);
207     for i = 1:Z_l
208
209         Z(i) = xyz{1,i}(1,3);
210     end
211
212     %% Calculates the U_xy, U_yz and U_xz
213     %U=Q/A
214     %Q=0.044m^3/s
215     %A=1*0.175 = L * h
216     h = 0.11; %change this to your max height value
217     U = 0.044 ./ h;
218
219     U_xy = sqrt((U_temporal ./ U).^2+(V_temporal ./ U).^2);
220     U_yz = sqrt((V_temporal ./ U).^2+(W_temporal ./ U).^2);
221     U_xz = sqrt((U_temporal ./ U).^2+(W_temporal ./ U).^2);
222
223     %% Mean Vorticidade
224     [WZ,WX] = gradient(W_temporal,Z,X);
225     [UZ,UX] = gradient(U_temporal,Z,X);
226
227     Wm_y = (UZ - WX) * (h ./ U);
228     Wm_x = 'Different section';
229     Wm_z = 'Different section';
230
231     U_temporal = U_temporal ./ U;
232     V_temporal = V_temporal ./ U;
233     W_temporal = W_temporal ./ U;
234
235     %%
236     Sml = 0;
237     SW = 0;
238
239     else
240         disp('No known Section. ');
241     end
242
243 end

```

Figura III.4: Parte 4 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores médios.

A N E X O



IV

**CÓDIGO PARA ORGANIZAR A BASE DE
DADOS DOS VALORES INSTANTÂNEOS**

ANEXO IV. CÓDIGO PARA ORGANIZAR A BASE DE DADOS DOS VALORES INSTANTÂNEOS

```
1  % This function creates a database with the instantaneous velocity and instantaneous
2  % pressure values,
3  % organized by cross-section
4  function [Basedados_valores_instantaneos] = main_database_instant(U_tr,P)
5  %% Removes the TC
6  Cells = load('Cell');
7  Cell = Cells.Cell;
8
9  b = find(Cell(:,2) < 0);
10
11  Cell(b,:) = [];
12
13  for i = 1 : length(U_tr)
14
15      U_tr(i).U(b,:) = [];
16      P(i).p(b,:) = [];
17
18  end
19
20
21  %% Organizes all the files with the positions in the channel
22  long = size(U_tr,2);
23  for kk = 1 : long
24
25      x = unique(Cell(:,1));
26      leng = length(x);
27      for i = 1 : leng
28
29          %% Finding the Height values
30          X = find(Cell(:,1) == x(i));
31
32          %% Separate the x value from the Others
33          Px(:,1) = Cell(X,1);
34          Px(:,2) = Cell(X,2);
35          Px(:,3) = Cell(X,3);
36
37          Ux(:,1) = U_tr(kk).U(X,1);
38          Ux(:,2) = U_tr(kk).U(X,2);
39          Ux(:,3) = U_tr(kk).U(X,3);
40
41          Prex(:,1) = P(kk).p(X,1);
42
43          %% Find diferent X values
44          Py(:,1) = unique(Px(:,2));
45
46          %% Finding the desired X values
47          for l = 1 : length(Py)
48
49              small = find(Px(:,2) == Py(l));
50
51              %% Create a matrix with the right positions of xyz and velocities
52              J(:,1) = Px(small,1);
53              J(:,2) = Px(small,2);
54              J(:,3) = Px(small,3);
55
56              [B,I] = sort(J(:,3), 'ascend');
57
58              J(:,3) = B;
59
60              Point(:,1) = J(:,1);
61              Point(:,2) = J(:,2);
62              Point(:,3) = J(:,3);
63
64              W(:,1) = Ux(small,1);
65              W(:,2) = Ux(small,2);
66              W(:,3) = Ux(small,3);
67
68              PP(:,1) = Prex(small,1);
```

Figura IV.1: Parte 1 do código usado para organizar numa base de dados os valores instantâneos.

```

69
70         Vel(:,1) = W(I,1);
71         Vel(:,2) = W(I,2);
72         Vel(:,3) = W(I,3);
73
74         Press(:,1) = PP(I,1);
75
76         %% creates three matrix, xyz, velocity and pressure. Separated by cross
77         section
78         q = length(B);
79
80         for j = 1 : q
81
82             xyz_1{1,j} = [Point(j,1) Point(j,2) Point(j,3)];
83
84             V_ff{1,j} = [Vel(j,1) Vel(j,2) Vel(j,3)];
85
86             P_ff{1,j} = Press(j,1);
87
88         end
89
90     end
91
92     n = size(xyz_1,1);
93
94     m = size(xyz_1,2);
95
96     U_temporall = zeros(n,m);
97     V_temporall = zeros(n,m);
98     W_temporall = zeros(n,m);
99     P_temporall = zeros(n,m);
100
101     %% Organizes velocities in different files
102     for ii = 1 : n;
103
104         for jj = 1 : m;
105
106             U_temporall(ii,jj) = V_ff{ii,jj}(1,1);
107
108             V_temporall(ii,jj) = V_ff{ii,jj}(1,2);
109
110             W_temporall(ii,jj) = V_ff{ii,jj}(1,3);
111
112             P_temporall(ii,jj) = P_ff{ii,jj}(1,1);
113
114         end
115     end
116
117     %% Flip the matrix columns
118     U_temporal(i,kk).xyz = flipud(U_temporall);
119     V_temporal(i,kk).xyz = flipud(V_temporall);
120     W_temporal(i,kk).xyz = flipud(W_temporall);
121     P_temporal(i,kk).xyz = flipud(P_temporall);
122
123     xyz(i).xyz = xyz_1;
124 end
125
126 Basedados_valores_instantaneos.xyz = xyz;
127 Basedados_valores_instantaneos.U_temporal = U_temporal;
128 Basedados_valores_instantaneos.V_temporal = V_temporal;
129 Basedados_valores_instantaneos.W_temporal = W_temporal;
130 Basedados_valores_instantaneos.P_temporal = P_temporal;
131 Basedados_valores_instantaneos.Cell = Cell;
132
133 save('Basedados_valores_instantaneos','Basedados_valores_instantaneos','-v7.3')
134
135 end

```

Figura IV.2: Parte 2 do código usado para organizar numa base de dados os valores instantâneos.



**CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA
BASE DE DADOS DOS VALORES
INSTANTÂNEOS**

ANEXO V. CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA BASE DE DADOS DOS VALORES INSTANTÂNEOS

```
1  % This function calculates multiple parameters, you only have to choose
2  % which section (Long, Cros, Vert) to do it and which value of x, y or z
3  % depending on the section
4
5  function
6  [X,Y,Z,U_temporal,V_temporal,W_temporal,flu_u,flu_v,flu_w,flu_p,xyz,P_temporal,J_in,K,P_
7  lu,bij,II,III,ins_x,ins_y,ins_z,Wi_x,Wi_y,Wi_z,esp_P,esp_U,esp_V,esp_W] =
8  main_instant_values(section,Basedados_valores_instantaneos)
9  %% Select the right section
10 if section == 'Cros'
11     %% selects which crosssection and extracts it's values
12     prompt = 'Which x position? ';
13     x = input(prompt);
14
15     X = unique(Basedados_valores_instantaneos.Cell(:,1));
16     x_value = find(X == x);
17
18     xyz = Basedados_valores_instantaneos.xyz(x_value).xyz;
19
20     leng = size(Basedados_valores_instantaneos.U_temporal,2);
21     for i = 1:leng
22         U_temporal(i).U = Basedados_valores_instantaneos.U_temporal(x_value,i).xyz;
23         V_temporal(i).V = Basedados_valores_instantaneos.V_temporal(x_value,i).xyz;
24         W_temporal(i).W = Basedados_valores_instantaneos.W_temporal(x_value,i).xyz;
25         P_temporal(i).P = Basedados_valores_instantaneos.P_temporal(x_value,i).xyz;
26
27     end
28
29     %% Create X and Y vectors to tecplot read
30     Y_1 = size(xyz,1);
31
32     for i = 1:Y_1
33         Y(i) = xyz{i,1}(1,2);
34
35     end
36
37     Z_1 = size(xyz,2);
38
39     for i = 1:Z_1
40         Z(i) = xyz{1,i}(1,3);
41
42     end
43
44     %% Does the mean values
45     f = length(U_temporal(1).U);
46     h = size(U_temporal(1).U,2);
47     U_mean = zeros(f,h);
48     V_mean = zeros(f,h);
49     W_mean = zeros(f,h);
50     P_mean = zeros(f,h);
51
52     for s = 1 : f;
53
54         for i = 1 : length(U_temporal);
55
56             x_1(i,:) = U_temporal(i).U(s,:);
57             x_2(i,:) = V_temporal(i).V(s,:);
58             x_3(i,:) = W_temporal(i).W(s,:);
59             p(i,:) = P_temporal(i).P(s,:);
60
61         end
62
63         U_mean(s,:) = mean(x_1);
64         V_mean(s,:) = mean(x_2);
65         W_mean(s,:) = mean(x_3);
66         P_mean(s,:) = mean(p); % Kg / (m s^2)
```

Figura V.1: Parte 1 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

```

67
68     end
69
70     %% Calculates the velocity fluctuations
71     for ii = 1 : length(U_temporal);
72
73         i = size(U_temporal(1).U,1);
74         for p11 = 1 : i
75
76             j = size(U_temporal(1).U,2);
77             for p21 = 1 : j
78
79                 flu_u(ii).U(p11,p21) = U_temporal(ii).U(p11,p21) -
80                 U_mean(p11,p21);
81                 flu_v(ii).V(p11,p21) = V_temporal(ii).V(p11,p21) -
82                 V_mean(p11,p21);
83                 flu_w(ii).W(p11,p21) = W_temporal(ii).W(p11,p21) - W_mean(p11,p21);
84                 flu_p(ii).P(p11,p21) = P_temporal(ii).P(p11,p21) - P_mean(p11,p21);
85
86             end
87         end
88     end
89
90     %% Mean(flx'*fly') and K parameter
91     %U=Q/A
92     %Q=0.044m^3/s
93     %A=1*0.175 = L * h
94     h = 0.11; %Change this to your max height value
95     U = 0.044 ./ h;
96     clear i j ii
97
98     for ii = 1 : length(U_temporal);
99
100         m = size(flu_u(1).U,1);
101         for i = 1 : m
102
103             n = size(flu_u(1).U,2);
104             for j = 1 : n
105
106                 Flu_uu_1(ii).X(i,j) = (flu_u(ii).U(i,j) * flu_u(ii).U(i,j));
107                 Flu_vv_1(ii).X(i,j) = (flu_v(ii).V(i,j) * flu_v(ii).V(i,j));
108                 Flu_ww_1(ii).X(i,j) = (flu_w(ii).W(i,j) * flu_w(ii).W(i,j));
109                 Flu_uv_1(ii).X(i,j) = (flu_u(ii).U(i,j) * flu_v(ii).V(i,j));
110                 Flu_uw_1(ii).X(i,j) = (flu_u(ii).U(i,j) * flu_w(ii).W(i,j));
111                 Flu_vw_1(ii).X(i,j) = (flu_v(ii).V(i,j) *
112                 flu_w(ii).W(i,j));
113
114             end
115         end
116     end
117
118     clear i j ii m n
119
120     for i = 1 : size(flu_u(1).U,1);
121         for j = 1 : length(U_temporal)
122
123             fl_1(j,:) = Flu_uu_1(j).X(i,:);
124             fl_2(j,:) = Flu_vv_1(j).X(i,:);
125             fl_3(j,:) = Flu_ww_1(j).X(i,:);
126             fl_4(j,:) = Flu_uv_1(j).X(i,:);
127             fl_5(j,:) = Flu_uw_1(j).X(i,:);
128             fl_6(j,:) = Flu_vw_1(j).X(i,:);
129
130         end
131
132         Flu_uu(i,:) = mean(fl_1);
133         Flu_vv(i,:) = mean(fl_2);
134         Flu_ww(i,:) = mean(fl_3);
135         Flu_uv(i,:) = mean(fl_4);
136         Flu_uw(i,:) = mean(fl_5);
137         Flu_vw(i,:) = mean(fl_6);
138     end

```

Figura V.2: Parte 2 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

ANEXO V. CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA BASE DE DADOS DOS VALORES INSTANTÂNEOS

```

133     Flu_uw(i,:) = mean(fl_5);
134     Flu_vw(i,:) = mean(fl_6);
135
136     Flu_uu_U(i,:) = mean(fl_1) / (U).^2;
137     Flu_vv_U(i,:) = mean(fl_2) / (U).^2;
138     Flu_wv_U(i,:) = mean(fl_3) / (U).^2;
139     Flu_uv_U(i,:) = mean(fl_4) / (U).^2;
140     Flu_uw_U(i,:) = mean(fl_5) / (U).^2;
141     Flu_vw_U(i,:) = mean(fl_6) / (U).^2;
142
143     end
144
145     clear i j ii m n
146     m = size(Flu_uu,1);
147     for i = 1 : m
148
149         n = size(Flu_uu,2);
150         for j = 1 : n
151
152             K(i,j) = 0.5 * (Flu_uu(i,j) + Flu_vv(i,j) + Flu_wv(i,j));
153
154             K_U(i,j) = 0.5 * (Flu_uu_U(i,j) + Flu_vv_U(i,j) + Flu_wv_U(i,j));
155
156         end
157     end
158
159     clear i j n m a b x y l
160
161     %% calculates bij
162     n = size(flu_u(1).U,1);
163     m = size(flu_u(1).U,2);
164
165     for i = 1 : n
166         for j = 1 : m
167             for a = 1 : 3
168                 for b = 1 : 3
169                     nn = size(flu_u,2);
170                     for kk = 1 : nn
171
172                         if a == b
173                             delta = 1;
174                         else
175                             delta = 0;
176                         end
177
178                         if a == 1
179                             x(kk) = flu_u(kk).U(i,j);
180                         elseif a == 2
181                             x(kk) = flu_v(kk).V(i,j);
182                         else
183                             x(kk) = flu_w(kk).W(i,j);
184                         end
185
186                         if b == 1
187                             y(kk) = flu_u(kk).U(i,j);
188                         elseif b == 2
189                             y(kk) = flu_v(kk).V(i,j);
190                         else
191                             y(kk) = flu_w(kk).W(i,j);
192                         end
193
194                         xy(kk) = x(kk) .* y(kk);
195
196                     end
197
198                     l(a,b) = ((mean(xy)) ./ (2 .* K(i,j)) - (delta ./
199                        3));
200

```

Figura V.3: Parte 3 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

```

201         end
202     end
203
204     bij{i,j} = 1;
205
206     clear l
207
208     end
209 end
210
211 %% Calculates the anisotropy tensor invariants
212 n = size(flu_u(1).U,1);
213 m = size(flu_u(1).U,2);
214 clear a b i j
215
216 for i = 1 : n
217     for j = 1 : m
218
219         a = (bij{i,j}(1,1) .* bij{i,j}(2,2) + bij{i,j}(1,1) .* bij{i,j}(3,3) +
220             bij{i,j}(2,2) .* bij{i,j}(3,3) - bij{i,j}(2,1) .^2 - bij{i,j}(3,1) .^2
221             - bij{i,j}(3,2) .^2);
222         b = (bij{i,j}(1,1) .* bij{i,j}(2,2) .* bij{i,j}(3,3)) + (2 *
223             (bij{i,j}(1,2) .* bij{i,j}(1,3) .* bij{i,j}(2,3))) - (bij{i,j}(1,1) .*
224             (bij{i,j}(2,3) .^2)) - (bij{i,j}(2,2) .* (bij{i,j}(1,3) .^2)) -
225             (bij{i,j}(3,3) .* (bij{i,j}(1,2) .^2)));
226
227         II(i,j) = - a;
228         III(i,j) = b;
229
230         clear a b
231     end
232 end
233
234 clear i j
235
236 %% Calculates the J parameter
237 n = size(II,1);
238 m = size(II,2);
239 for i = 1:n
240     for j = 1:m
241
242         J_in(i,j) = 1 - 9 * (((0.5) * II(i,j)) - III(i,j));
243     end
244 end
245
246 %% calculates the instantaneous vorticity
247 for ii = 1 : length(U_temporal);
248     [WZ,WY] = gradient(W_temporal(ii).W,Z,Y);
249     [VZ,VY] = gradient(V_temporal(ii).V,Z,Y);
250
251     Wi_x(ii).X = (WY - VZ) * (h ./ U);
252     Wi_y = 'Different section';
253     Wi_z = 'Different section';
254
255     clear WZ WY VZ VY
256 end
257
258 %% better organization to do after treatments
259 n = size(flu_p(1).P,1);
260 m = size(flu_p(1).P,2);
261 for i = 1 : n
262     for j = 1 : m
263
264         for ii = 1 : length(flu_p)
265
266             esp_P(i,j).P(ii) = flu_p(ii).P(i,j);
267             esp_U(i,j).U(ii) = flu_u(ii).U(i,j);
268             esp_V(i,j).V(ii) = flu_v(ii).V(i,j);

```

Figura V.4: Parte 4 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

ANEXO V. CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA BASE DE DADOS DOS VALORES INSTANTÂNEOS

```

265         esp_W(i,j).W(ii) = flu_w(ii).W(i,j);
266     end
267 end
268 end
269
270
271 %% select another section, but uses the code in order to calculate the same variables
272 elseif section == 'Long'
273
274     %% selects which crosssection and extracts it's values
275     prompt = 'Which z position? ';
276     z = input(prompt);
277
278     Z = unique(Basedados_valores_instantaneos.Cell(:,3));
279     z_value = find(Z == z);
280
281     leng = size(Basedados_valores_instantaneos.U_temporal,2);
282     for ii = 1:leng
283
284         leng1 = length(Basedados_valores_instantaneos.xyz);
285         for i = 1 : leng1
286
287             leng2 = length(Basedados_valores_instantaneos.xyz(1).xyz);
288             for j = 1 : leng2
289
290                 xyz{i,j} = Basedados_valores_instantaneos.xyz(i).xyz{j,z_value};
291                 U_temporal(ii).U(i,j) =
292                     Basedados_valores_instantaneos.U_temporal(i,ii).xyz{j,z_value};
293                 V_temporal(ii).V(i,j) =
294                     Basedados_valores_instantaneos.V_temporal(i,ii).xyz{j,z_value};
295                 W_temporal(ii).W(i,j) =
296                     Basedados_valores_instantaneos.W_temporal(i,ii).xyz{j,z_value};
297                 P_temporal(ii).P(i,j) =
298                     Basedados_valores_instantaneos.P_temporal(i,ii).xyz{j,z_value};
299
300             end
301         end
302     end
303
304     leng = size(Basedados_valores_instantaneos.U_temporal,2);
305     for ii = 1:leng
306
307         U_temporal(ii).U = fliplr(U_temporal(ii).U);
308         V_temporal(ii).V = fliplr(V_temporal(ii).V);
309         W_temporal(ii).W = fliplr(W_temporal(ii).W);
310         P_temporal(ii).P = fliplr(P_temporal(ii).P);
311
312     end
313
314     %% Create X and Y vectors to tecplot read
315     X_1 = size(xyz,1);
316     for i = 1:X_1
317
318         X(i) = xyz{i,1}(1,1);
319     end
320
321     Y_1 = size(xyz,2);
322     for i = 1:Y_1
323
324         Y(i) = xyz{1,i}(1,2);
325     end
326
327     %% does the mean values
328     f = length(U_temporal(1).U);
329     h = size(U_temporal(1).U,2);
330     U_mean = zeros(f,h);
331     V_mean = zeros(f,h);
332     W_mean = zeros(f,h);
333     P_mean = zeros(f,h);
334
335     for s = 1 : f;

```

Figura V.5: Parte 5 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

```

330
331     for i = 1 : length(U_temporal);
332
333         x_1(i,:) = U_temporal(i).U(s,:);
334         x_2(i,:) = V_temporal(i).V(s,:);
335         x_3(i,:) = W_temporal(i).W(s,:);
336         p(i,:) = P_temporal(i).P(s,:);
337
338     end
339
340     U_mean(s,:) = mean(x_1);
341     V_mean(s,:) = mean(x_2);
342     W_mean(s,:) = mean(x_3);
343     P_mean(s,:) = mean(p); % Kg / (m s^2)
344
345 end
346
347 %% calculates the velocity fluctuations
348 for ii = 1 : length(U_temporal);
349
350     i = size(U_temporal(1).U,1);
351     for p11 = 1 : i
352
353         j = size(U_temporal(1).U,2);
354         for p21 = 1 : j
355
356             flu_u(ii).U(p11,p21) = U_temporal(ii).U(p11,p21) -
357                 U_mean(p11,p21);
358             flu_v(ii).V(p11,p21) = V_temporal(ii).V(p11,p21) -
359                 V_mean(p11,p21);
360             flu_w(ii).W(p11,p21) = W_temporal(ii).W(p11,p21) - W_mean(p11,p21);
361             flu_p(ii).P(p11,p21) = P_temporal(ii).P(p11,p21) - P_mean(p11,p21);
362
363         end
364     end
365 end
366
367 %% mean(flx'*fly') nad K parameter
368 %U=Q/A
369 %Q=0.044m^3/s
370 %A=1*0.175 = L * h
371 h = 0.11; %change this to your max height value
372 U = 0.044 ./ h;
373 clear i j ii
374
375 for ii = 1 : length(U_temporal);
376
377     m = size(flu_u(1).U,1);
378     for i = 1 : m
379
380         n = size(flu_u(1).U,2);
381         for j = 1 : n
382
383             Flu_uu_1(ii).X(i,j) = (flu_u(ii).U(i,j) * flu_u(ii).U(i,j));
384             Flu_vv_1(ii).X(i,j) = (flu_v(ii).V(i,j) * flu_v(ii).V(i,j));
385             Flu_wv_1(ii).X(i,j) = (flu_w(ii).W(i,j) * flu_v(ii).V(i,j));
386             Flu_uv_1(ii).X(i,j) = (flu_u(ii).U(i,j) * flu_v(ii).V(i,j));
387             Flu_uw_1(ii).X(i,j) = (flu_u(ii).U(i,j) * flu_w(ii).W(i,j));
388             Flu_vw_1(ii).X(i,j) = (flu_v(ii).V(i,j) * flu_w(ii).W(i,j));
389             Flu_p_1(ii).P(i,j) = (flu_p(ii).P(i,j) .* flu_p(ii).P(i,j));
390
391         end
392     end
393 end
394
395 clear i j ii m n
396
397 for i = 1 : size(flu_u(1).U,1);
398
399     for j = 1 : length(U_temporal)

```

Figura V.6: Parte 6 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

ANEXO V. CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA BASE DE DADOS DOS VALORES INSTANTÂNEOS

```

397
398         fl_1(j,:) = Flu_uu_1(j).X(i,:);
399         fl_2(j,:) = Flu_vv_1(j).X(i,:);
400         fl_3(j,:) = Flu_ww_1(j).X(i,:);
401         fl_4(j,:) = Flu_uv_1(j).X(i,:);
402         fl_5(j,:) = Flu_uw_1(j).X(i,:);
403         fl_6(j,:) = Flu_vw_1(j).X(i,:);
404         fl_7p(j,:) = Flu_p_1(j).P(i,:);
405
406     end
407
408     Flu_uu(i,:) = mean(fl_1);
409     Flu_vv(i,:) = mean(fl_2);
410     Flu_ww(i,:) = mean(fl_3);
411     Flu_uv(i,:) = mean(fl_4);
412     Flu_uw(i,:) = mean(fl_5);
413     Flu_vw(i,:) = mean(fl_6);
414     Flu_p(i,:) = mean(fl_7p);
415
416     Flu_uu_U(i,:) = mean(fl_1) / (U).^2;
417     Flu_vv_U(i,:) = mean(fl_2) / (U).^2;
418     Flu_ww_U(i,:) = mean(fl_3) / (U).^2;
419     Flu_uv_U(i,:) = mean(fl_4) / (U).^2;
420     Flu_uw_U(i,:) = mean(fl_5) / (U).^2;
421     Flu_vw_U(i,:) = mean(fl_6) / (U).^2;
422
423     end
424
425     clear i j ii m n
426     m = size(Flu_uu,1);
427     for i = 1 : m
428
429         n = size(Flu_uu,2);
430         for j = 1 : n
431
432             K(i,j) = 0.5 * (Flu_uu(i,j) + Flu_vv(i,j) + Flu_ww(i,j));
433
434         end
435     end
436
437     %% calculates the turbulent instabilities
438     ins_x = sqrt(Flu_uu);
439     ins_y = sqrt(Flu_vv);
440     ins_z = sqrt(Flu_ww);
441
442     %% calculates bij
443     clear i j n m a b x y l
444
445
446     n = size(flu_u(1).U,1);
447     m = size(flu_u(1).U,2);
448
449     for i = 1 : n
450         for j = 1 : m
451             for a = 1 : 3
452                 for b = 1 : 3
453                     nn = size(flu_u,2);
454                     for kk = 1 : nn
455
456                         if a == b
457                             delta = 1;
458                         else
459                             delta = 0;
460                         end
461
462                         if a == 1
463                             x(kk) = flu_u(kk).U(i,j);
464                         elseif a == 2
465                             x(kk) = flu_v(kk).V(i,j);

```

Figura V.7: Parte 7 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

```

466         else
467             x(kk) = flu_w(kk).W(i,j);
468         end
469
470         if b == 1
471             y(kk) = flu_u(kk).U(i,j);
472         elseif b == 2
473             y(kk) = flu_v(kk).V(i,j);
474         else
475             y(kk) = flu_w(kk).W(i,j);
476         end
477
478         xy(kk) = x(kk) .* y(kk);
479
480     end
481
482     l(a,b) = ((mean(xy)) ./ (2 .* K(i,j)) - (delta ./
483 3));
484
485     end
486 end
487
488     bij{i,j} = 1;
489
490     clear l
491
492 end
493 end
494
495 %% Calculates the anisotropy tensor invariants
496 n = size(flu_u(1).U,1);
497 m = size(flu_u(1).U,2);
498 clear a b i j
499
500 for i = 1 : n
501     for j = 1 : m
502
503         a = (bij{i,j}(1,1) .* bij{i,j}(2,2) + bij{i,j}(1,1) .* bij{i,j}(3,3) +
504             bij{i,j}(2,2) .* bij{i,j}(3,3) + bij{i,j}(2,1) .^2 + bij{i,j}(3,1) .^2
505             + bij{i,j}(3,2) .^2);
506         b = (bij{i,j}(1,1) .* bij{i,j}(2,2) .* bij{i,j}(3,3)) + (2 *
507             (bij{i,j}(1,2) .* bij{i,j}(1,3) .* bij{i,j}(2,3))) - bij{i,j}(1,1) .*
508             (bij{i,j}(2,3) .^2) - bij{i,j}(2,2) .* (bij{i,j}(1,3) .^2) -
509             bij{i,j}(3,3) .* (bij{i,j}(1,2) .^2);
510
511         II(i,j) = - a;
512         III(i,j) = b;
513
514         clear a b
515     end
516 end
517
518 clear i j
519
520 %% Calculates the J parameter
521 n = size(II,1);
522 m = size(II,2);
523 for i = 1:n
524     for j = 1:m
525
526         J_in(i,j) = 1 - 9 * (((0.5) * II(i,j)) - III(i,j));
527     end
528 end
529
530 %% calculates the instantaneous vorticity
531 for ii = 1 : length(U_temporal);
532     [UY,UX] = gradient(U_temporal(ii).U,Y,X);
533     [VY,VX] = gradient(V_temporal(ii).V,Y,X);

```

Figura V.8: Parte 8 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

ANEXO V. CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA BASE DE DADOS DOS VALORES INSTANTÂNEOS

```

529
530     Wi_z(ii).Z = (VX - UY) * (h ./ U);
531     Wi_y = 'Different section';
532     Wi_x = 'Different section';
533
534     clear WZ WY VZ VY
535     end
536
537     clear ii i j k n m
538
539     %% better organization to do after treatments
540     n = size(flu_p(1).P,1);
541     m = size(flu_p(1).P,2);
542     for i = 1 : n
543
544         for j = 1 : m
545
546             for ii = 1 : length(flu_p)
547
548                 esp_P(i,j).P(ii) = flu_p(ii).P(i,j);
549                 esp_U(i,j).U(ii) = flu_u(ii).U(i,j);
550                 esp_V(i,j).V(ii) = flu_v(ii).V(i,j);
551                 esp_W(i,j).W(ii) = flu_w(ii).W(i,j);
552             end
553         end
554     end
555
556
557     %% select the last section
558     elseif section == 'Vert'
559         prompt = 'Which y position? ';
560         y = input(prompt);
561
562         Y = unique(Basedados_valores_instantaneos.Cell(:,2));
563         y_value = find(Y == y);
564
565         leng = size(Basedados_valores_instantaneos.U_temporal,2);
566         for ii = 1:leng
567
568             leng1 = length(Basedados_valores_instantaneos.xyz);
569             for i = 1 : leng1
570
571                 leng2 = size(Basedados_valores_instantaneos.xyz(1).xyz,2);
572                 for j = 1 : leng2
573
574                     xyz{i,j} = Basedados_valores_instantaneos.xyz(i).xyz{y_value,j};
575                     U_temporal(ii).U(i,j) =
576                         Basedados_valores_instantaneos.U_temporal(i).xyz(y_value,j);
577                     V_temporal(ii).V(i,j) =
578                         Basedados_valores_instantaneos.V_temporal(i).xyz(y_value,j);
579                     W_temporal(ii).W(i,j) =
580                         Basedados_valores_instantaneos.W_temporal(i).xyz(y_value,j);
581                     P_temporal(ii).P(i,j) =
582                         Basedados_valores_instantaneos.P_temporal(i).xyz(y_value,j);
583                 end
584             end
585         end
586         %%ver se e necessário o flip
587
588         %% Create X and Y vectors to tecplot read
589         X_l = size(xyz,1);
590         for i = 1:X_l
591
592             X(i) = xyz{i,1}(1,1);
593         end
594
595         Z_l = size(xyz,2);
596         for i = 1:Z_l

```

Figura V.9: Parte 9 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

```

594     Z(i) = xyz{1,i}(1,3);
595 end
596
597 %% does the mean values
598
599 f = length(U_temporal(1).U);
600 h = size(U_temporal(1).U,2);
601 U_mean = zeros(f,h);
602 V_mean = zeros(f,h);
603 W_mean = zeros(f,h);
604 P_mean = zeros(f,h);
605
606 for s = 1 : f;
607
608     for i = 1 : length(U_temporal);
609
610         x_1(i,:) = U_temporal(i).U(s,:);
611         x_2(i,:) = V_temporal(i).V(s,:);
612         x_3(i,:) = W_temporal(i).W(s,:);
613         p(i,:) = P_temporal(i).P(s,:);
614
615     end
616
617     U_mean(s,:) = mean(x_1);
618     V_mean(s,:) = mean(x_2);
619     W_mean(s,:) = mean(x_3);
620     P_mean(s,:) = mean(p); % Kg / (m s^2)
621
622 end
623
624 %% calculates the velocity flutuations
625 for ii = 1 : length(U_temporal);
626
627     i = size(U_temporal(1).U,1);
628     for p11 = 1 : i
629
630         j = size(U_temporal(1).U,2);
631         for p21 = 1 : j
632
633             flu_u(ii).U(p11,p21) = U_temporal(ii).U(p11,p21) -
634             U_mean(p11,p21);
635             flu_v(ii).V(p11,p21) = V_temporal(ii).V(p11,p21) -
636             V_mean(p11,p21);
637             flu_w(ii).W(p11,p21) = W_temporal(ii).W(p11,p21) - W_mean(p11,p21);
638             flu_p(ii).P(p11,p21) = P_temporal(ii).P(p11,p21) - P_mean(p11,p21);
639
640         end
641     end
642
643     %% mean(flx'*fly') nad K parameter
644     %U=Q/A
645     %Q=0.044m^3/s
646     %A=1*0.175 = L * h
647     h = 0.11; %change this to your max height value
648     U = 0.044 ./ h;
649     clear i j ii
650
651     for ii = 1 : length(U_temporal);
652
653         m = size(flu_u(1).U,1);
654         for i = 1 : m
655
656             n = size(flu_u(1).U,2);
657             for j = 1 : n
658
659                 Flu_uu_1(ii).X(i,j) = (flu_u(ii).U(i,j) * flu_u(ii).U(i,j));
660                 Flu_vv_1(ii).X(i,j) = (flu_v(ii).V(i,j) * flu_v(ii).V(i,j));
661                 Flu_ww_1(ii).X(i,j) = (flu_w(ii).W(i,j) * flu_w(ii).W(i,j));

```

Figura V.10: Parte 10 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

ANEXO V. CÓDIGO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA BASE DE DADOS DOS VALORES INSTANTÂNEOS

```

661         Flu_uv_1(ii).X(i,j) = (flu_u(ii).U(i,j) * flu_v(ii).V(i,j));
662         Flu_uw_1(ii).X(i,j) = (flu_u(ii).U(i,j) * flu_w(ii).W(i,j));
663         Flu_vw_1(ii).X(i,j) = (flu_v(ii).V(i,j) * flu_w(ii).W(i,j));
664         Flu_p_1(ii).P(i,j) = (flu_p(ii).P(i,j) .* flu_p(ii).P(i,j));
665     end
666     end
667 end
668
669 clear i j ii m n
670
671 for i = 1 : size(flu_u(1).U,1);
672     for j = 1 : length(U_temporal)
673         fl_1(j,:) = Flu_uu_1(j).X(i,:);
674         fl_2(j,:) = Flu_vv_1(j).X(i,:);
675         fl_3(j,:) = Flu_ww_1(j).X(i,:);
676         fl_4(j,:) = Flu_uv_1(j).X(i,:);
677         fl_5(j,:) = Flu_uw_1(j).X(i,:);
678         fl_6(j,:) = Flu_vw_1(j).X(i,:);
679         fl_7p(j,:) = Flu_p_1(j).P(i,:);
680
681     end
682
683     Flu_uu(i,:) = mean(fl_1);
684     Flu_vv(i,:) = mean(fl_2);
685     Flu_ww(i,:) = mean(fl_3);
686     Flu_uv(i,:) = mean(fl_4);
687     Flu_uw(i,:) = mean(fl_5);
688     Flu_vw(i,:) = mean(fl_6);
689     Flu_p(i,:) = mean(fl_7p);
690
691     Flu_uu_U(i,:) = mean(fl_1) / (U.^2);
692     Flu_vv_U(i,:) = mean(fl_2) / (U.^2);
693     Flu_ww_U(i,:) = mean(fl_3) / (U.^2);
694     Flu_uv_U(i,:) = mean(fl_4) / (U.^2);
695     Flu_uw_U(i,:) = mean(fl_5) / (U.^2);
696     Flu_vw_U(i,:) = mean(fl_6) / (U.^2);
697
698 end
699
700 clear i j ii m n
701 m = size(Flu_uu,1);
702 for i = 1 : m
703     n = size(Flu_uu,2);
704     for j = 1 : n
705         K(i,j) = 0.5 * (Flu_uu(i,j) + Flu_vv(i,j) + Flu_ww(i,j));
706     end
707 end
708
709 %% calculates the turbulent instabilities
710 ins_x = sqrt(Flu_uu);
711 ins_y = sqrt(Flu_vv);
712 ins_z = sqrt(Flu_ww);
713
714 %% calculates bij
715 clear i j n m a b x y l
716
717 n = size(flu_u(1).U,1);
718 m = size(flu_u(1).U,2);
719
720 for i = 1 : n
721     for j = 1 : m
722         for a = 1 : 3
723             for b = 1 : 3

```

Figura V.11: Parte 11 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

```

730         nn = size(flu_u,2);
731         for kk = 1 : nn
732
733             if a == b
734                 delta = 1;
735             else
736                 delta = 0;
737             end
738
739             if a == 1
740                 x(kk) = flu_u(kk).U(i,j);
741             elseif a == 2
742                 x(kk) = flu_v(kk).V(i,j);
743             else
744                 x(kk) = flu_w(kk).W(i,j);
745             end
746
747             if b == 1
748                 y(kk) = flu_u(kk).U(i,j);
749             elseif b == 2
750                 y(kk) = flu_v(kk).V(i,j);
751             else
752                 y(kk) = flu_w(kk).W(i,j);
753             end
754
755             xy(kk) = x(kk) .* y(kk);
756
757             end
758
759             l(a,b) = ((mean(xy)) ./ (2 .* K(i,j)) - (delta ./
760 3));
761
762         end
763     end
764
765     bij{i,j} = l;
766
767     clear l
768
769     end
770 end
771
772 %% Calculates the anisotropy tensor invariants
773 n = size(flu_u(1).U,1);
774 m = size(flu_u(1).U,2);
775 clear a b i j
776
777 for i = 1 : n
778     for j = 1 : m
779
780         a = (bij{i,j}(1,1) .* bij{i,j}(2,2) + bij{i,j}(1,1) .* bij{i,j}(3,3) +
bij{i,j}(2,2) .* bij{i,j}(3,3)) + bij{i,j}(2,1) .^2 + bij{i,j}(3,1) .^2
+ bij{i,j}(3,2) .^2;
781         b = (bij{i,j}(1,1) .* bij{i,j}(2,2) .* bij{i,j}(3,3)) + (2 *
(bij{i,j}(1,2) .* bij{i,j}(1,3) .* bij{i,j}(2,3))) - bij{i,j}(1,1) .*
(bij{i,j}(2,3) .^2) - bij{i,j}(2,2) .* (bij{i,j}(1,3) .^2) -
bij{i,j}(3,3) .* (bij{i,j}(1,2) .^2);
782
783         II(i,j) = - a;
784         III(i,j) = b;
785
786         clear a b
787     end
788 end
789
790 clear i j
791
792 %% Calculates the J parameter

```

Figura V.12: Parte 12 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.

ANEXO V. CÓDIGO USADO PARA TRATAR OS RESULTADOS DA BASE DE DADOS DOS VALORES INSTANTÂNEOS

```

793     n = size(II,1);
794     m = size(II,2);
795     for i = 1:n
796         for j = 1:m
797
798             J_in(i,j) = 1 - 9 * (((0.5) * II(i,j)) - III(i,j));
799         end
800     end
801
802     % calculates the instantaneous vorticity
803     for ii = 1 : length(U_temporal);
804         [UY,UX] = gradient(U_temporal(ii).U,Y,X);
805         [VY,VX] = gradient(V_temporal(ii).V,Y,X);
806
807         Wi_z(ii).Z = (VX - UY) * (h ./ U);
808         Wi_y = 'Different section';
809         Wi_x = 'Different section';
810
811         clear WZ WY VZ VY
812     end
813
814     clear i j ii
815
816     % Deals with the pressure
817     P_flu = (Flu_p) ./ (1000 .*^2 * U .*^4);
818
819     clear ii i j k n m
820
821     % does the pressure and velocities spectrum
822     n = size(flu_p(1).P,1);
823     m = size(flu_p(1).P,2);
824     for i = 1 : n
825
826         for j = 1 : m
827
828             for ii = 1 : length(flu_p)
829
830                 esp_P(i,j).P(ii) = flu_p(ii).P(i,j);
831                 esp_U(i,j).U(ii) = flu_u(ii).U(i,j);
832                 esp_V(i,j).V(ii) = flu_v(ii).V(i,j);
833                 esp_W(i,j).W(ii) = flu_w(ii).W(i,j);
834             end
835         end
836     end
837
838
839
840     else
841         disp('No known Section.');
```

Figura V.13: Parte 13 do código usado para tratar os resultados da base de dados dos valores instantâneos.