

Hidrodinâmica de escoamentos turbulentos na interface de áreas com vegetação – Estudo experimental

Ana Sofia Pires de Paula e Cunha

(Versão final após defesa)

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

Orientador: Prof.^a Doutora Cristina Maria Sena Fael
Coorientador: Doutora Ana Margarida da Costa Ricardo

junho de 2020

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação foi o culminar do meu percurso académico e não teria sido possível sem o apoio e amizade de várias pessoas e entidades, às quais desejo expressar os meus agradecimentos.

Em primeiro lugar agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Cristina Maria Sena Fael pelo apoio incondicional, disponibilidade, encorajamento e por toda a amizade e momentos de boa disposição ao longo deste trabalho.

À minha coorientadora científica, Doutora Ana Margarida da Costa Ricardo, por toda a ajuda e conhecimento transmitido.

Agradeço o apoio do técnico superior do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI), o Eng.º Albino da Ascensão dos Santos Alves, pela ajuda na execução do trabalho experimental e por todos os momentos de boa disposição.

A todos os professores que me auxiliaram ao longo do meu percurso académico.

A todos os meus amigos, que de alguma maneira transmitiram a motivação necessária.

À minha família, por me acompanharem ao longo da vida e me terem dado força e condições para a minha formação.

Por último, ao Daniel, por todo o apoio, motivação e compreensão.

Este trabalho foi apoiado com fundos nacionais portugueses pela FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do Projeto PTDC/ECI-EGS/29835/2017 - POCI-01-0145-FEDER-029835.

A todos muito obrigada!

RESUMO

A vegetação ripícola desempenha importantes funções no equilíbrio do ecossistema, bem como melhora a qualidade da água. Nas últimas décadas, devido às preocupações ambientais e à proteção contra inundações, a necessidade de entender o comportamento hidrodinâmico dos rios tem crescido. A presença de vegetação afeta a resistência hidráulica, o transporte de massas, a quantidade de movimento e a estrutura do escoamento turbulento, com várias implicações ecológicas e morfológicas.

O objetivo da presente dissertação é compreender a hidrodinâmica do escoamento na interface de áreas com vegetação.

De modo a interpretar melhor a influência da vegetação na estrutura do escoamento foram realizados ensaios experimentais no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas (LHFE), na Universidade da Beira Interior (UBI). O leito do canal foi parcialmente coberto por uma matriz uniforme de cilindros metálicos alinhados.

O trabalho prático consistiu na medição de campos de velocidade instantânea com o auxílio de um Velocímetro Doppler Acústico (ADV), e o tratamento de dados foi realizado num *software* próprio, denominado *WinADV*.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a distribuição das velocidades longitudinais apresentam perfis típicos, quer para o corredor ripícola, quer para o canal principal, sendo quase constante no canal com hastes, e quase logarítmico a aumentar para a superfície no canal principal.

A existência de um corredor ripícola leva a que parte do escoamento se afaste dele, percorrendo o trajeto que oferece menor resistência, havendo transferências de massas entre a zona vegetada e o canal principal. Foi ainda possível concluir que o efeito local da presença das hastes é suprimido pelo efeito de corte da camada de mistura.

Palavras-chave

Vegetação emersa rígida, ADV, Escoamento turbulento, Interface, Anisotropia

Abstract

The riparian vegetation has an important role not only in the balance of the ecosystems but also on water quality improvement. In the past decades, due to environmental concerns and protection against floods, the need to understand the hydrodynamical behavior of the rivers has been growing. The existence of vegetation affects the hydraulic resistance, on mass transport, quantity of movement and turbulent flow structure, which leads to several environmental and morphological implications.

The aim of this thesis is to understand the hydrodynamics of the flow in the interface of vegetated areas.

In order to better understand the influence of vegetation in the flow structure, several experimental studies were carried out at the Laboratory of Hydraulics and Structures (LHFE), at University of Beira Interior (UBI). During these studies, the channel bed was partially covered by an array of circular in a staggered arrangement.

In order to meet the proposed objective, the experimental tests were done by measurement instantaneous velocity fields using an ADV device and the data treatment was done with a specific software known as WinADV.

The results reveal that the distribution of longitudinal velocities show typical profiles in both vegetated and non-vegetated area. It was also observed that for vegetated areas the profile presented a constant behavior while the main channel exhibited a logarithmic profile.

The existence of a riparian zone leads to that part of the flow move away from it and consequently, follow the path that offers less resistance. In this way, there are mass transfer between vegetated and non-vegetated area. It was also concluded that the shear stress effect of the mixing layer overlaps the local effect of the presence of the stem.

Keywords

Rigid emergent vegetation, ADV, Turbulent flow, Interface, Anisotropy

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Apresentação e enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Organização da dissertação	3
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1 Escoamentos em canais sem vegetação	5
2.1.1 Caracterização do escoamento laminar e turbulento	5
2.1.2 Conceito de camada limite.....	6
2.2 Escoamentos em torno de uma haste cilíndrica.....	7
2.3 Escoamentos em canais com vegetação emersa	11
2.4 Equações de Navier-Stokes.....	14
2.5 Equações de Reynolds <i>Averaged</i> Navier-Stokes (RANS)	15
2.6 Intensidade turbulenta	18
2.7 Anisotropia do escoamento	19
Capítulo 3 - Instalação experimental e equipamentos de medição.....	22
3.1 Considerações gerais.....	22
3.2 Descrição do canal de Estruturas Hidráulicas.....	22
3.3 Equipamentos de medição.....	26
3.3.1 Medição do Caudal.....	26
3.3.2 Medição da altura do escoamento	27
3.3.3 Medições das velocidades instantâneas do escoamento	27
Capítulo 4 – Procedimento experimental e tratamento de dados	30
4.1 Considerações gerais.....	30
4.2 Procedimento experimental	30
4.3 Tratamento de dados	34
4.3.1 Filtragem dos dados das velocidades.....	34
Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados	38
5.1 Considerações gerais.....	38
5.2 Componente longitudinal da velocidade	38
5.2.1 Perfis verticais da velocidade longitudinal média temporal.....	38

5.2.2	Distribuição transversal das velocidades médias no tempo e no espaço	42
5.3	Componente transversal da velocidade.....	44
5.3.1	Perfis verticais da velocidade transversal média temporal	44
5.3.2	Distribuição transversal das velocidades médias no tempo e no espaço	47
5.4	Componente vertical da velocidade.....	49
5.4.1	Perfis verticais da velocidade vertical média temporal	49
5.4.2	Distribuição transversal das velocidades médias no tempo e no espaço	52
5.5	Tensões de Reynolds	54
5.5.1	Distribuição das tensões de corte horizontais	54
5.5.2	Distribuição das tensões de corte verticais.....	56
5.5.3	Distribuição das tensões de corte laterais	58
5.5.4	Distribuição das tensões normais horizontais.....	60
5.5.5	Distribuição das tensões normais laterais	63
5.5.6	Distribuição das tensões normais verticais	65
5.6	Distribuição espacial da anisotropia	67
Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões para futuras investigações		70
6.1	Conclusões	70
6.2	Sugestões para futuras investigações	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Regimes de escoamento: a) Regime laminar; b) Regime de transição; c) Regime turbulento (Novais-Barbosa, 1985).....	6
Figura 2.2: Desenvolvimento do campo de velocidades e da camada limite ao longo de uma superfície (Barbosa, 2014).....	7
Figura 2.3: Alteração do campo de pressões a montante de um elemento vertical (Fael, 2008).....	8
Figura 2.4: Estrutura do escoamento em torno de um elemento vertical cilíndrico (Fael, 2008).....	9
Figura 2.5: Configuração da esteira a jusante de um cilindro, com diâmetro D , para diferentes números de Reynolds: a) $ReD < 0,5$; b) $ReD \approx 2 - 30$; c) $ReD \approx 40 - 70$; d) $ReD > 90$ (Massey, 2002).....	10
Figura 2.6: Separação da camada limite, o ponto S é o ponto de separação (adaptado de Heron, 2007).....	11
Figura 2.7: Vista superior de um canal com vegetação emersa ao longo da margem direita (sombreado a cinza) (adaptado de Nepf, 2012).....	12
Figura 2.8: Perfil de velocidade representativo das duas regiões na camada de corte – região interna δ_i e região externa δ_o (White e Nepf, 2007).....	13
Figura 2.9: Flutuações de velocidade ao longo do tempo em escoamentos turbulentos.....	16
Figura 2.10: Limites dos valores do -II e III invariantes do tensor de anisotropia de tensão de Reynolds e os possíveis estados de turbulência, apresentadas por Lumley (1978) (Hamilton e Cal, 2014).....	21
Figura 3.1: Vista exterior do canal.....	22
Figura 3.2: Planta do canal de Estruturas hidráulicas.....	23
Figura 3.3: Canal hidráulico: a) Reservatório; b) Canal; c) Bomba e medidor de caudal eletromagnético.....	24
Figura 3.4: Entrada do canal, vista de jusante.....	25
Figura 3.5: Comporta pendular e guincho.....	25
Figura 3.6: Carrinhos de apoio à medição.....	25
Figura 3.7: Caudalímetro eletromagnético instalado na tubagem do circuito de alimentação.....	26
Figura 3.8: Hidrómetro instalado no carrinho do canal.....	27
Figura 3.9: Sistema de aquisição de dados Nortek ADV.....	28
Figura 3.10: Pormenor construtivo do Vectrino Plus com downlooking (adaptado de Nortek (2009)).....	28

Figura 4.1: a) Vista de montante do canal com os tubos metálicos; b) matriz dos tubos metálicos.....	31
Figura 4.2: Pormenor da posição das secções onde foram medidas as alturas da superfície livre.....	31
Figura 4.3: Evolução da altura do escoamento	32
Figura 4.4: Desenho esquemático com a identificação das secções transversais e longitudinais de medição	33
Figura 4.5: Janela do programa Vectrino Plus	34
Figura 4.6: Método Phase-Space para o ponto I2 para $y = 0,032$ m	36
Figura 4.7: Série temporal da componente da velocidade longitudinal para o ponto I2 a $y=0,032$ m antes da aplicação do filtro no programa WinADV.....	37
Figura 4.8: Série temporal da componente da velocidade longitudinal para o ponto I2 a $y=0,032$ m após a aplicação do filtro no programa WinADV	37
Figura 5.1: Perfis verticais médios temporais (u linhas a ponteados) e perfis médios no espaço e no tempo (u linhas contínuas) - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante.....	38
Figura 5.2: Compilação dos perfis verticais médios temporais (u linhas a ponteados) e perfil médio no espaço e no tempo (u linha contínua).....	39
Figura 5.3: Visualização do escoamento (o escoamento ocorre da esquerda para a direita) – Vista de cima; a) $t=1$ s; b) $t=2$ s.....	41
Figura 5.4: Distribuição transversal da componente longitudinal das velocidades médias no espaço e no tempo: a) secção a 6,0 m, b) secção a 6,5 m e c) secção a 7,0 m	42
Figura 5.5: Distribuição transversal média da componente longitudinal das velocidades médias no espaço e no tempo nas três secções	43
Figura 5.6: Perfis verticais médios temporais (v linhas a ponteados) e perfis médios no espaço e no tempo (v linhas contínuas) - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante.....	45
Figura 5.7: Compilação dos perfis verticais médios temporais (v linhas a ponteados) e perfil médio no espaço e no tempo (v linha contínua).....	46
Figura 5.8: Distribuição transversal da componente transversal das velocidades médias no espaço e no tempo: a) secção a 6,0 m, b) secção a 6,5 m e c) secção a 7,0 m	47
Figura 5.9: Distribuição transversal média da componente transversal das velocidades médias no espaço e no tempo nas três secções	48
Figura 5.10: Perfis verticais médios temporais (w linhas a ponteados) e perfis médios no espaço e no tempo (w linhas contínuas) - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante.....	49

Figura 5.11: Compilação dos perfis verticais médios temporais (w linhas a ponteados) e perfil médio no espaço e no tempo (w linha contínua)	50
Figura 5.12: Distribuição transversal da componente vertical das velocidades médias no espaço e no tempo: a) secção a 6,0 m, b) secção a 6,5 m e c) secção a 7,0 m	52
Figura 5.13: Distribuição transversal média da componente vertical das velocidades médias no espaço e no tempo nas três secções - montante, intermédia e jusante	53
Figura 5.14: Distribuição das tensões de corte horizontais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante	54
Figura 5.15: Distribuição das tensões de corte verticais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante	56
Figura 5.16: Distribuição das tensões de corte laterais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante	59
Figura 5.17: Distribuição das tensões normais horizontais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante	61
Figura 5.18: Distribuição das tensões normais laterais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante	63
Figura 5.19: Distribuição das tensões normais verticais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante	65
Figura 5.20: Distribuição dos invariantes da anisotropia no triângulo de Lumley, ao longo da profundidade do escoamento	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1: Distâncias das secções longitudinais e transversais dos níveis da superfície livre.....	32
Tabela 5.1: Valores de u (ms^{-1}) para os pontos em estudo	40
Tabela 5.2: Valores de v (ms^{-1}) para os pontos em estudo	46
Tabela 5.3: Valores de w (ms^{-1}) para os pontos em estudo	51
Tabela 5.4: Valores de τ_{xy} (Pa) para os pontos em estudo.....	55
Tabela 5.5: Valores de τ_{xz} (Pa) para os pontos em estudo	57
Tabela 5.6: Valores de τ_{yz} (Pa) para os pontos em estudo	60
Tabela 5.7: Valores de τ_{xx} (Pa) para os pontos em estudo	62
Tabela 5.8: Valores de τ_{yy} (Pa) para os pontos em estudo.....	64
Tabela 5.9: Valores de τ_{zz} (Pa) para os pontos em estudo	66

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

ADV	Velocímetro Doppler Acústico (<i>Acoustic Doppler Velocimeter</i>)
COR	Correlação
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
LHFE	Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas
PSTM	<i>Phase-Space thresholding method</i>
PVC	Policloreto de vinilo
RANS	Reynolds <i>Averaged</i> Navier-Stokes
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
UBI	Universidade da Beira Interior

SIMBOLOGIA

a	Eixo maior da projeção da elipsoide no plano $\Delta^2 u_i$ versus u_i	-
a_{ij}	Tensor de anisotropia de tensão de Reynolds	Pa
A_f	Área ocupado pelo fluido	m ²
b	Eixo menor da projeção da elipsoide no plano $\Delta^2 u_i$ versus u_i	-
b	Largura do corredor ripícola	m
b_{ij}	Tensor adimensional de anisotropia	Pa
g_i	Componente da ação gravítica segunda a direção i	ms ²
h	Altura do escoamento	m
K	Energia cinética turbulenta	m ² s ⁻²
n	Número de amostras	-
p	Pressão local do fluido	Nm ⁻²
R	Raio hidráulico	m
Re	Número de Reynolds	-
Re_D	Número de Reynolds das hastes	-
s	Espaçamento médio entre hastes	m
t	Tempo	s
u	Componente da velocidade na direção longitudinal	ms ⁻¹
u_i	Componente da velocidade segundo a direção i	ms ⁻¹
\bar{u}	Velocidade longitudinal média temporal	ms ⁻¹
u_i'	Flutuação turbulenta da velocidade segundo a direção i	ms ⁻¹
u'	Flutuação turbulenta da velocidade longitudinal	ms ⁻¹
$\langle \bar{u} \rangle$	Velocidade longitudinal média temporal e espacial	ms ⁻¹
U	Velocidade média do escoamento	ms ⁻¹
U_s	Velocidade de escorregamento	ms ⁻¹
U_{rms}	Intensidade turbulenta longitudinal	ms ⁻¹
U_0	Velocidade média do escoamento não perturbado	ms ⁻¹
U_1	Velocidade média do escoamento dentro da matriz de vegetação	ms ⁻¹
U_2	Velocidade média do escoamento no canal central contíguo à matriz de vegetação	ms ⁻¹
v	Componente da velocidade na direção transversal	ms ⁻¹
\bar{v}	Velocidade transversal média temporal	ms ⁻¹
v'	Flutuação turbulenta da velocidade transversal	ms ⁻¹

$\langle \bar{v} \rangle$	Velocidade transversal média temporal e espacial	ms^{-1}
$[\bar{v}]$	Média na coluna de água da velocidade transversal média temporal	ms^{-1}
V_{rms}	Intensidade turbulenta transversal	ms^{-1}
w	Componente da velocidade na direção vertical	ms^{-1}
\bar{w}	Velocidade vertical média temporal	ms^{-1}
w'	Flutuação turbulenta da velocidade vertical	ms^{-1}
$\langle \bar{w} \rangle$	Velocidade vertical média temporal e espacial	ms^{-1}
W_{rms}	Intensidade turbulenta vertical	ms^{-1}
x	Distância longitudinal	m
x_D	Secção limite do desvio do escoamento	m
X	Variável aleatória do escoamento	-
\bar{X}	Média da variável aleatória do escoamento	-
X'	Flutuação turbulenta da variável aleatória do escoamento	-
y	Distância transversal	m
Y	Variável aleatória do escoamento	-
\bar{Y}	Média da variável aleatória do escoamento	-
Y'	Flutuação turbulenta da variável aleatória do escoamento	-
z	Distância vertical	m
δ	Espessura da camada limite	m
δ_{ij}	Função delta de Kronecker	-
δ_0	Espessura da camada de corte na zona exterior às hastes, no canal principal	m
δ_1	Espessura da camada de corte zona interior das hastes	m
Δu_i	Primeira derivada de u_i	ms^{-1}
$\Delta^2 u_i$	Segunda derivada de u_i	ms^{-1}
θ	Variável genérica	-
$\bar{\theta}$	Média temporal	-
θ'	Flutuação temporal	-
$\bar{\theta}'$	Média das flutuações	-
Θ	Ângulo de rotação do eixo principal de $\Delta^2 u_i$ vs u_i	$^\circ$
λ_U	Parâmetro universal	-
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
ρ	Massa volúmica do fluido	kgm^{-3}

$\hat{\sigma}$	Desvio padrão	-
τ	Tensão de corte	Pa
τ_{xx}	Tensões de Reynolds normais horizontais	Pa
τ_{yy}	Tensões de Reynolds normais laterais	Pa
τ_{zz}	Tensões de Reynolds normais verticais	Pa
τ_{xy}	Tensões de Reynolds de corte horizontais	Pa
τ_{xz}	Tensões de Reynolds de corte verticais	Pa
τ_{yz}	Tensões de Reynolds de corte laterais	Pa
ν	Viscosidade cinemática do fluido	m ² s ⁻¹

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Apresentação e enquadramento

A vegetação marginal nos leitos dos rios, denominada de corredor ripícola, pode surgir naturalmente ou ser plantada pelo homem contribuindo positivamente para o meio ambiente, nomeadamente na prevenção contra a erosão das margens, na preservação dos habitats e no melhoramento da paisagem. Inicialmente, a vegetação emersa presente nos cursos de água era vista como fonte de resistência ao escoamento, sendo removida para permitir uma passagem mais adequada da água e reduzir as inundações. À posteriori, constatou-se que a sua presença promove a retenção natural da água, melhorando as condições hidromorfológicas e garantindo o escoamento (Arixpe *et al.* 2009).

A vegetação presente nas margens dos cursos de águas e nas planícies de inundação são responsáveis por alterar, por vezes, de forma significativa, as características hidrodinâmicas do escoamento, gerando impactos ao nível da resistência hidráulica e da turbulência; as taxas de transporte de sedimentos, gerando impactos ao nível da morfologia do leito. No entanto, esta desempenha um papel crucial no equilíbrio ambiental dos seus ecossistemas e na proteção contra os efeitos erosivos das suas margens (Ormerod *et al.*, 1993; McKenney *et al.*, 1995; Abernethy e Rutherford, 1998; Simon e Collison, 2002; Pollen, 2007).

As interações entre o escoamento e a vegetação são fenómenos bastante difíceis de analisar pois dependem das características da vegetação, das características do curso de água e do regime de escoamento, tendo sido descritos por diversos autores, nomeadamente, Kadlec (1990), Nepf (1999) e Yen (2002). No entanto, e apesar da vegetação ser omnipresente nos cursos de água, os seus efeitos na turbulência junto ao leito, nas taxas de transporte de material sólido e na sedimentação, não são ainda integralmente compreendidos (Yager e Schmeeckle, 2013).

Ao longo das últimas décadas, vários trabalhos de investigação, numéricos e laboratoriais, têm sido realizados com vista a analisar a influência da presença da vegetação no leito dos rios e com o objetivo de corrigir lacunas no processo dos modelos de cálculo da resistência hidráulica. A título de exemplo, citam-se os estudos desenvolvidos laboratorialmente por Nepf (1999), bem como os trabalhos de campo e numéricos realizados por Nikora *et al.* (2007).

O interesse do estudo da resistência associada às hastas, deve-se ao facto de se querer estimar a altura da água com a maior precisão possível, de forma a garantir uma melhor gestão dos sistemas fluviais, para definir medidas de intervenção nos cursos de água que asseguram a eficiência hidráulica sem prejudicar a diversidade ecológica (Järvelä, 2002; Green, 2006).

A presença de vegetação aquática altera a estrutura média e turbulenta do escoamento, em parte devido ao gradiente de velocidade que se verifica entre o escoamento no canal principal, mais rápido, e na zona vegetada, mais lento. Este gradiente de velocidades gera uma camada de mistura na interface de áreas com vegetação com implicações para a troca de massa e quantidade de movimento. A estrutura turbulenta do escoamento foi explorada aplicando a técnica do triângulo de Lumley, com base nos invariantes do tensor de tensão anisotrópico de Reynolds, onde se estuda a distribuição do grau e natureza da anisotropia.

Em face ao exposto, o presente estudo tem como objetivo estudar a hidrodinâmica de escoamentos turbulentos na interface de áreas com vegetação.

Esta dissertação enquadra-se no projeto PTDC/ECI-EGS/29835/2017 - POCI-01-0145-FEDER-029835 financiado pela Fundação da Ciência e Tecnologia.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da dissertação consiste no estudo experimental do escoamento em canais de seção retangular com vegetação emersa rígida numa das suas margens, tirando partido da instalação experimental existente na Universidade da Beira Interior. Deste modo, o presente trabalho visa aprofundar o conhecimento dos mecanismos envolvidos no escoamento na interface entre o canal principal e o corredor ripícola, caracterizando a distribuição de velocidades, das tensões de Reynolds e a anisotropia.

A componente experimental, realizada em condições controladas, inclui a realização de ensaios, recolha e tratamento de dados relativos às velocidades instantâneas e alturas de escoamento, realizadas através de uma técnica intrusiva de medição de velocidades do escoamento recorrendo a um instrumento de medida, o Velocímetro Doppler Acústico (ADV).

A interação entre o leito principal e o corredor ripícola é caracterizada avaliando a importância relativa dos efeitos da turbulência nas transferências de massa e quantidade de movimento.

1.3 Metodologia

O presente estudo, de caráter experimental, tem como base os princípios fundamentais da hidrodinâmica de escoamentos turbulentos.

Pretende-se caracterizar o escoamento hidrodinâmico de um trecho de canal, constituído, numa das margens, por vegetação emersa rígida.

Numa fase inicial, o trabalho experimental, incide na caracterização da superfície livre e na análise do desenvolvimento da camada limite do escoamento, a fim de estabelecer um escoamento aproximadamente uniforme com a camada de mistura completamente desenvolvida.

Com as condições iniciais adequadas e testadas, procede-se à medição de velocidades pontuais, em secções predefinidas, através do ADV.

No tratamento de dados, com vista a obter os perfis de velocidade médios (no tempo e no espaço) de velocidades longitudinais, transversais e verticais, aplica-se para a filtragem do ruído e outros pontos erróneos a metodologia PSTM (*Phase-Space Thresholding Method*) desenvolvida por Goring e Nikora (2002) e modificada e implementada no *software WinADV* por Wahl (2002).

De modo a melhor compreender o comportamento hidrodinâmico dos cursos de água na presença de vegetação, realiza-se a análise e discussão de resultados.

1.4 Organização da dissertação

A dissertação é constituída por seis capítulos, sendo o presente capítulo introdutório onde se apresenta uma breve exposição da temática que irá ser estudada e os objetivos pretendidos com o estudo.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão dos conhecimentos mais relevantes existentes na literatura, sobre hidrodinâmica de escoamentos em áreas com vegetação emersa.

No terceiro capítulo, descreve-se a instalação experimental e os equipamentos de medição utilizados no estudo.

No quarto capítulo, descreve-se o procedimento experimental adotado assim com se descrevem os ensaios realizados.

No quinto capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos, com particular ênfase na interface entre o corredor ripícola e o canal principal, fazendo uma analogia com os resultados recolhidos na revisão de conhecimentos.

No sexto e último capítulo, estão sintetizadas as principais conclusões obtidas no presente estudo, apresentando-se sugestões para investigações futuras.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1 Escoamentos em canais sem vegetação

2.1.1 Caracterização do escoamento laminar e turbulento

A presente secção, diz respeito à caracterização de escoamentos com superfície livre. Este tipo de escoamento, que pode ocorrer quer ao longo de cursos de água (rios e ribeiras), quer ao longo de canais artificiais, é caracterizado pela presença de uma superfície de contacto entre a corrente líquida e o meio gasoso, normalmente a atmosfera. Esta superfície de contacto designa-se por superfície livre, e ao longo dela as pressões mantêm-se constantes e idênticas às exercidas pelo meio gasoso.

Seguidamente encontra-se uma breve descrição do escoamento laminar e turbulento, sendo o último caso de estudo na presente dissertação.

Existem três tipos de regimes de escoamento, o laminar, o de transição e o turbulento (Figura 2.1). O que distingue um regime laminar de um regime turbulento é a relação entre forças viscosas e forças de inércia (por unidade de volume, numa dada secção transversal e num dado instante), traduzida pelo Número de Reynolds do escoamento (Re),

$$Re = \frac{UR}{\nu} \quad (2.1)$$

Onde U é a velocidade média do escoamento, R representa o raio hidráulico e ν representa a viscosidade cinemática do fluido. Nos escoamentos com superfície livre, o escoamento laminar ocorre para valores de $Re < 500$, o regime turbulento para $Re > 2000$ e a passagem do escoamento laminar a turbulento não é definida com rigor, correspondendo-lhe uma zona de transição que, se considera compreendida entre $500 < Re < 2000$ (Rijo, 2010).

O regime turbulento é o que tem mais interesse prático, pois na natureza os escoamentos com superfície livre são, maioritariamente, deste tipo. Na caracterização do escoamento turbulento, bem como nas equações que os representam, considera-se a sobreposição dos valores médios e das flutuações. A turbulência está associada ao surgimento de estruturas no fluido onde as linhas de corrente assumem a forma de “espiral”, designadas por turbilhões ou vórtices (Quintela, 2005).

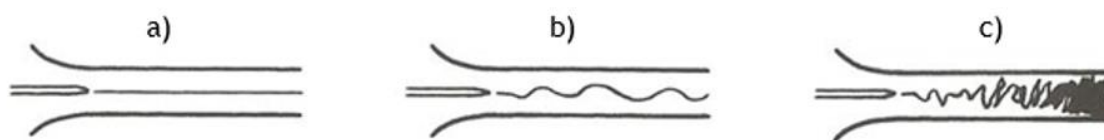


Figura 2.1: Regimes de escoamento: a) Regime laminar; b) Regime de transição; c) Regime turbulento (Novais-Barbosa, 1985)

Tennekes e Lumley (2010) admitem que a turbulência é uma característica do escoamento e não dos fluidos. As características fundamentais deste regime são: a irregularidade, a difusividade, o número de Reynolds elevado, as flutuações tridimensionais de vorticidade, a dissipação e o meio contínuo.

A turbulência é uma condição irregular do movimento, dado que as grandezas em questão apresentam variações no espaço e no tempo, e as variáveis envolvidas são consideradas aleatórias. Por sua vez a difusividade é responsável pela rápida mistura e um aumento das taxas de quantidade de movimento, calor e transferência de massa. Os escoamentos turbulentos são associados a números de Reynolds elevados, e são determinados através da Equação (2.1). A turbulência, rotacionalidade e tridimensionalidade, caracterizam-se por consideráveis níveis de vorticidade flutuante, que é ausente nos escoamentos bidimensionais. A dissipação de energia está relacionada com os regimes turbulentos. Estes regimes precisam de um fornecimento contínuo exterior de energia para compensar as perdas viscosas e para que a turbulência não seja amortecida. A turbulência é um fenômeno contínuo uma vez que as mais pequenas escalas são de ordem de grandeza muito superior a qualquer escala molecular.

2.1.2 Conceito de camada limite

O conceito de camada limite, proposto por Prandtl em 1904, é de grande relevância para o estudo de fluidos na proximidade de fronteiras fixas. Para números de Reynolds suficientemente elevados (escoamento turbulento) desenvolve-se uma camada de pequena espessura junto das paredes, influenciada pelos efeitos da viscosidade (subcamada laminar viscosa).

Como se pode observar na Figura 2.2, essa zona manifesta-se a partir do momento em que se inicia o contacto entre o líquido em movimento e a parede sólida. Assim, Prandtl estabeleceu que no exterior da camada limite os gradientes de velocidade são pequenos, e

que no seu interior há um grande gradiente de velocidades, não podendo por esse motivo desprezar-se a ação das forças de atrito nessa zona. À zona de grandes gradientes de velocidade correspondem tensões de corte elevadas, o que faz com que o escoamento retarde.

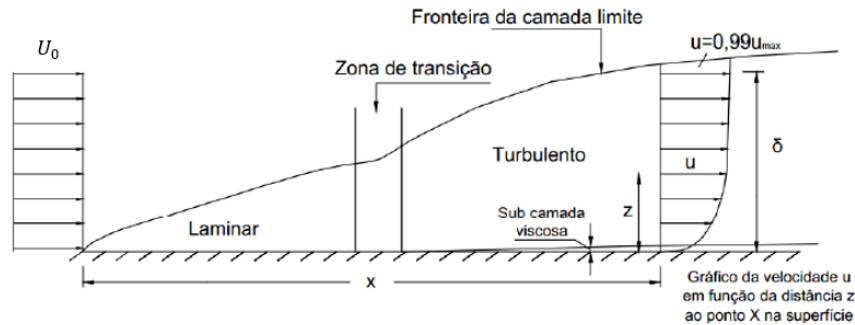


Figura 2.2: Desenvolvimento do campo de velocidades e da camada limite ao longo de uma superfície (Barbosa, 2014)

Existem diversas definições quanto à espessura da camada limite. Neste contexto considera-se que a espessura da camada limite é a distância δ , medida desde a superfície sólida até ao ponto onde a velocidade do fluido (u) é igual a 99% da velocidade média do escoamento não perturbado U_0 (Barbosa, 2014).

Considera-se que a camada limite está completamente desenvolvida quando a espessura da camada limite se mantém constante longitudinalmente. Até ao seu completo desenvolvimento a espessura da camada limite aumenta longitudinalmente. O perfil de velocidades assume uma forma logarítmica na camada limite e é constante entre o limite desta e a superfície livre.

2.2 Escoamentos em torno de uma haste cilíndrica

A inserção de um elemento vertical num escoamento completamente desenvolvido vai causar alterações consideráveis na estrutura turbulenta do escoamento, havendo alterações dos perfis de velocidade média, de intensidade da turbulência e de tensões de Reynolds. Na Figura 2.3 ilustra-se o comportamento do escoamento na presença de um elemento vertical cilíndrico.

A velocidade do escoamento vai diminuindo à medida que se aproxima do elemento vertical cilíndrico, levando à sua anulação na face montante (efeito de estagnação). Este

efeito produz um gradiente de pressões sobre a face montante, formando uma região de baixas pressões junto ao leito e uma de elevadas pressões junto à superfície livre (Figura 2.3).

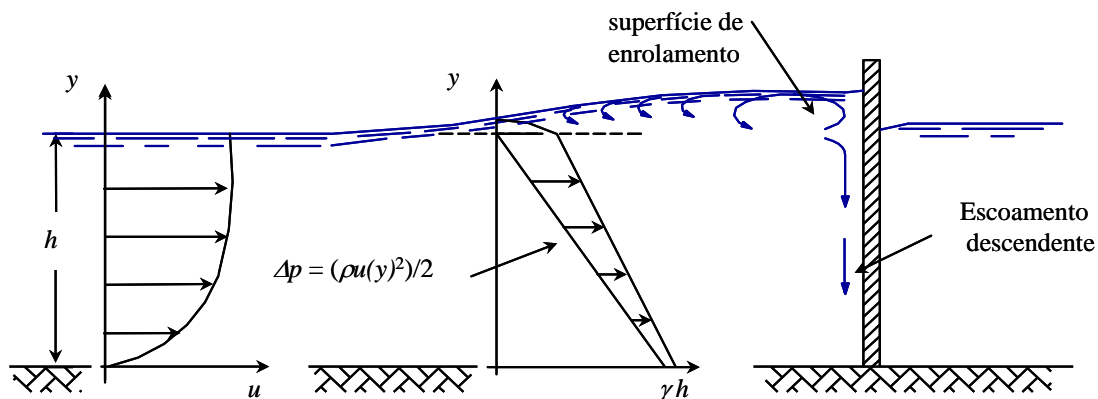


Figura 2.3: Alteração do campo de pressões a montante de um elemento vertical (Fael, 2008)

Como resultado das alterações de pressões, pode observar-se o aumento do nível da superfície livre a montante da face do pilar, o aparecimento de uma superfície de enrolamento e de um escoamento descendente. O escoamento descendente, ao colidir no leito, é parcialmente desviado para montante. As alterações de pressões também levam à separação do escoamento junto ao fundo, um pouco a montante do obstáculo, e na superfície lateral do pilar.

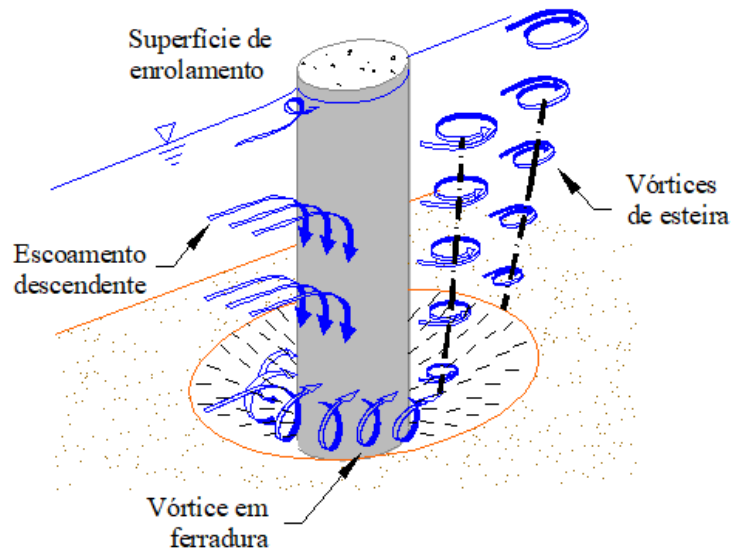


Figura 2.4: Estrutura do escoamento em torno de um elemento vertical cilíndrico (Fael, 2008)

A montante do elemento vertical, destaca-se a formação do vórtice de ferradura, e na superfície lateral a formação de vórtices de esteira, ocorrendo o seu desprendimento de uma forma periódica e alternada dos dois lados do elemento. Os vórtices de esteira apresentam sentidos de rotação alternados, desenvolvem-se para jusante do escoamento e são formados através da separação da camada limite da superfície lateral da estrutura vertical (Figura 2.4).

Na Figura 2.5 apresenta-se a configuração da esteira turbulenta a jusante de um elemento vertical cilíndrico para diferentes números de Reynolds. Como se compreende pela mesma figura, Massey (2002) considerou a esteira dividida em quatro tipos em função do número de Reynolds:

- Para valores de $Re_D < 0,5$, as forças de inércia são irrelevantes e as linhas de corrente encontram-se na extremidade a jusante do cilindro (Figura 2.5 a));
- Para valores de $2 < Re_D < 30$, a camada limite separa-se simetricamente, de ambos os lados do cilindro, nas posições S, originando dois turbilhões com sentidos de rotação opostos. A jusante dos turbilhões, as linhas de correntes unem-se novamente e o comprimento da esteira é limitado (Figura 2.5 b));
- Para valores de $40 < Re_D < 70$, os turbilhões alongam-se, mas este arranjo é instável e começa a observar-se uma oscilação periódica da esteira (Figura 2.5 c));

- Para valores de $Re_D > 90$ – os turbilhões desprendem-se alternadamente, de cada um dos lados do cilindro, e são arrastados para jusante de modo a formarem duas fiadas de vórtices, denominados por vórtices de von Kármán (Figura 2.5 d)).

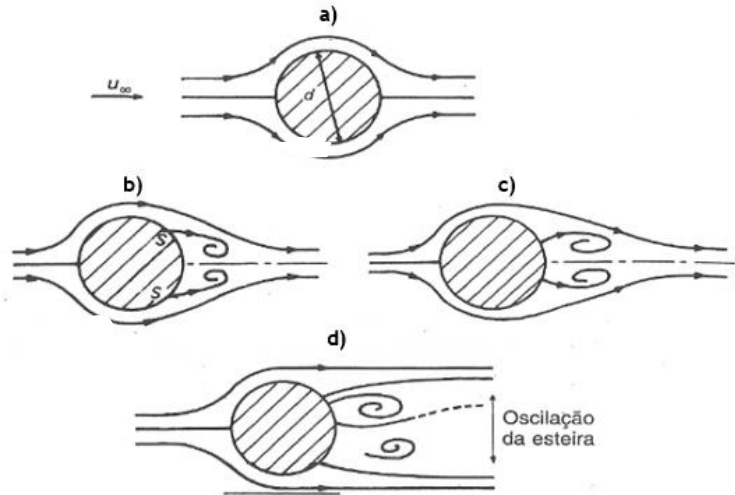


Figura 2.5: Configuração da esteira a jusante de um cilindro, com diâmetro D , para diferentes números de Reynolds: a) $Re_D < 0,5$; b) $Re_D \approx 2 - 30$; c) $Re_D \approx 40 - 70$; d) $Re_D > 90$ (Massey, 2002)

A formação de vórtices é causada pela separação da camada limite no corpo. Para ilustrar em que consiste o fenómeno da separação, considera-se o movimento de um líquido em redor de uma haste cilíndrica (Figura 2.6). O processo de separação é causado por baixas e altas pressões localizadas. As baixas pressões, quando exercidas no pilar, resultam no aumento da camada limite. A massa da camada limite é transportada para o fluxo externo. A camada limite vai separar-se quando o gradiente de velocidade perpendicular ao pilar se torna insignificante (Schlichting, 1968), resultante numa tensão de corte, τ , nula.

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) = 0 \quad (2.2)$$

Sendo μ a viscosidade dinâmica do fluido e $\frac{du}{dy}$ o gradiente de velocidades.

A posição, S , na qual a tensão de corte na parede é zero calcula-se através da integração das equações diferenciais da camada. O ângulo de separação junto de um cilindro sujeito a um regime de escoamento subcrítico ($300 < Re < 105$) é de aproximadamente 80° (Schlichting, 1968).

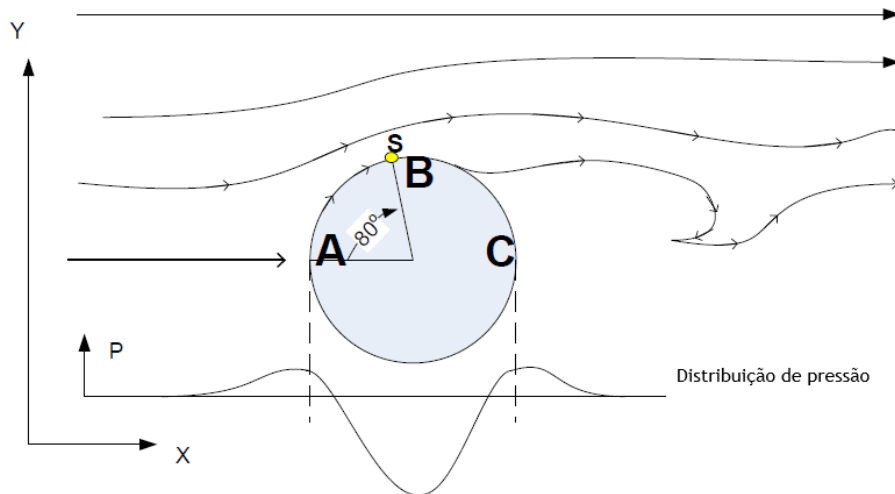


Figura 2.6: Separação da camada limite, o ponto S é o ponto de separação (adaptado de Heron, 2007)

O escoamento entre o ponto A e B pode considerar-se praticamente irrotacional, porque a espessura da camada limite é pequena. A energia cinética é máxima em B e tende a ser recuperada como energia de pressão de B para C. Contudo, como há consumo de energia neste trecho, a velocidade anula-se, não no ponto C, mas um pouco antes de o atingir. A separação do escoamento dá-se em dois pontos simétricos, onde se geram os vórtices (em sentidos contrários em cada um dos pontos de separação). Em certas condições, os vórtices desprendem-se e desintegram-se dando lugar a uma esteira turbulenta (Quintela, 2005).

2.3 Escoamentos em canais com vegetação emersa

O presente estudo versa sobre a influência da vegetação emersa rígida. Essa morfologia, representativa da vegetação emergente nas margens dos rios em pequena escala, apresenta um comportamento complexo carecendo, por isso, de estudo pormenorizado.

Segundo Nepf (1999), à escala macroscópica do escoamento na região vegetada os fortes gradientes na zona entre hastes não são suscetíveis de serem perceptíveis e o escoamento é designado como dispersivo. À escala do espaçamento médio entre hastes, a estrutura do escoamento é caracterizada fundamentalmente pela elevada heterogeneidade espacial. À escala da haste, o escoamento é similar ao que ocorre em redor de um cilindro de eixo vertical (Lory, 2011).

Tal como referido anteriormente, a presença de vegetação no leito dos cursos de água, origina um aumento da resistência hidráulica e, por conseguinte, leva ao aumento da altura do escoamento e à redução da sua velocidade média (Figura 2.7),

comparativamente aos leitos dos cursos de água sem vegetação (Green, 2006; Kadlec, 1990; Tanino e Nepf, 2008; Yen, 2002). A vegetação emersa promove a dispersão lateral impondo novas trajetórias sinuosas ao escoamento e aumenta a intensidade e difusão turbulenta (Nepf, 1999; White e Nepf, 2003), afetando a capacidade de transporte e deposição de sedimentos e contaminantes, por diminuição das tensões junto ao leito (López e García, 1998; Yen, 2002).

De acordo com Nepf (1999), a vegetação ripícola transforma a energia cinética média em energia turbulenta cinética à escala da vegetação. Esta transferência está diretamente ligada à geração de turbilhões, que afeta a tensão de arrastamento e a intensidade turbulenta do escoamento.

Na Figura 2.7 representa-se esquematicamente as alterações da velocidade média do escoamento ao longo de um canal no qual existe um corredor com vegetação emersa, com uma largura b , inserido na sua margem direita (área sombreada a cinzento).

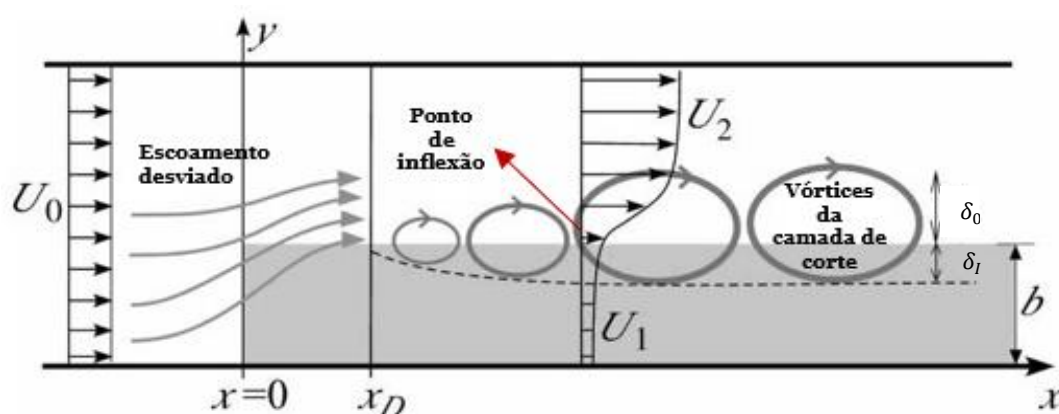


Figura 2.7: Vista superior de um canal com vegetação emersa ao longo da margem direita (sombreado a cinza) (adaptado de Nepf, 2012)

A montante da margem com vegetação, e numa zona não perturbada por ela, e para escoamentos completamente desenvolvidos, a velocidade média do escoamento pode considerar-se constante e igual a U_0 . A presença da margem com vegetação leva a que grande parte do escoamento se afaste dela seguindo o percurso que oferece menor resistência à sua passagem. Na Figura 2.7 apresenta-se a secção limite do desvio do escoamento, x_D , que coincide com o início da geração dos vórtices desenvolvidos na camada de corte designados por vórtices KH (Kelvin-Helmholtz). O ponto de inflexão que se verifica no perfil de velocidade e que se desenvolve ao longo da interface entre a vegetação e o canal central, é um ponto de instabilidade e é designado por instabilidade de Kelvin-Helmholtz (White e Nepf, 2007). U_1 e U_2 são as velocidades médias dentro da

matriz de vegetação e no canal central fora dessa influência, respectivamente. Tal como referido anteriormente, a diminuição de U_1 é devido a um aumento da resistência ao escoamento na zona da vegetação levando ao incremento na restante área, U_2 .

Pasche e Rouvé, em 1985, aplicaram um modelo bidimensional que divide o canal em três zonas: i) o canal principal, ii) a zona vegetada e iii) a zona de comunicação entre elas. Esta zona de comunicação é denominada camada de interface. É de grande interesse estudar a transição entre estas camadas pois vai influenciar o fluxo do canal e o balanço de massas entre o canal principal e a zona vegetada. A diferença de velocidades entre a zona i) e ii) resulta do equilíbrio entre o gradiente de pressão e da resistência hidráulica imposta pelas hastes, originando uma camada de corte. White e Nepf (2007), referem que existem duas regiões na camada de corte; uma região de transição muito acentuada contendo um ponto de inflexão, como já foi referido anteriormente, e uma região de transição mais gradual no canal principal em que a velocidade de assemelha a uma camada limite. Ambas as regiões têm a sua própria escala e devem ser tratadas separadamente. A primeira região determina a escala de comprimento sobre o qual a quantidade de movimento pode penetrar a vegetação, e a segunda região determina a largura da camada limite no canal principal. Os autores referem-se às duas regiões como camada interna, com espessura δ_i , e camada externa, com espessura δ_o , como apresentado na Figura 2.8.

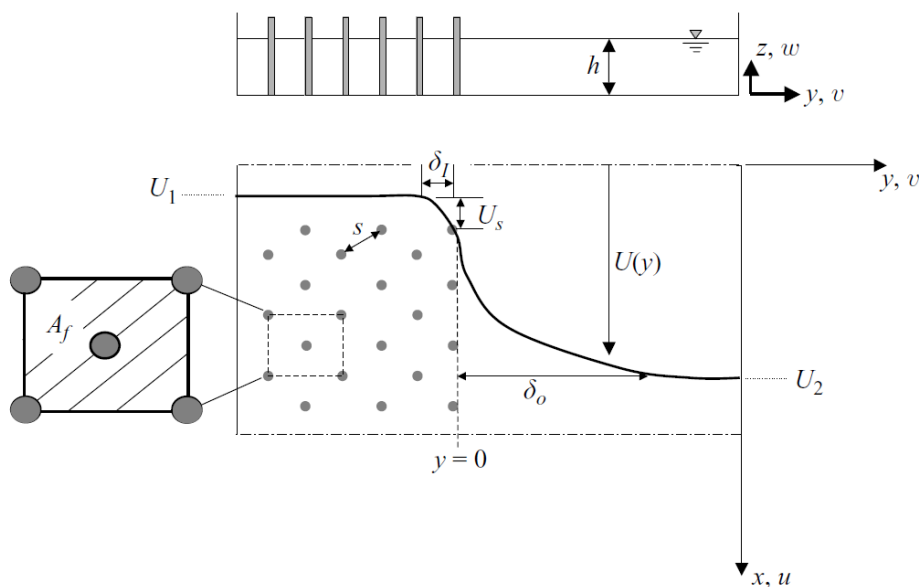


Figura 2.8: Perfil de velocidade representativo das duas regiões na camada de corte – região interna δ_i e região externa δ_o (White e Nepf, 2007)

Ao longo da interface ocorre uma elevada tensão de corte resultante do desequilíbrio entre o escoamento rápido no canal principal e o escoamento lento e obstruído dentro da

vegetação. O perfil de velocidade dentro dessa camada interna estreita exibe o ponto de inflexão e a característica da estrutura de uma camada de mistura e é bem descrito pelo perfil de corte tangencial hiperbólico, onde $y=0$ é o ponto de inflexão, U_s é a velocidade de escorregamento, $U_s = U_{y=0} - U_1$.

Além disso, observam-se vórtices coerentes que abrangem ambas as camadas e são os principais contribuintes para os fluxos das quantidades de movimento laterais.

2.4 Equações de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais não lineares que descrevem o escoamento de fluidos Newtonianos, permitindo determinar os campos de velocidade e de pressão num escoamento.

Estas equações representam a conservação da quantidade de movimento por unidade de volume nos fluidos em movimento e compõem um conjunto de leis fundamentais governativas do escoamento de fluidos em geral.

Em escoamentos incompressíveis e fluidos newtonianos (fluido em que cada componente da tensão tangencial é linearmente proporcional ao gradiente da velocidade na direção normal a essa componente), a equação de Navier-Stokes, expressa-se por (Novais-Barbosa, 1985; Pope, 2000):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.3)$$

onde u_i representa a componente da velocidade segundo a direção i , g_i caracteriza a componente da ação gravítica na direção i , p corresponde à pressão local do fluido e ρ a sua massa volúmica. A notação tensorial foi empregue de acordo com $(x_1, x_2, x_3) \equiv (x, y, z)$ e $(u_1, u_2, u_3) \equiv (u, v, w)$, dos quais os eixos x, y e z são orientados nas direções longitudinal, transversal e vertical do escoamento, na respetiva ordem, e u, v e w correspondem às componentes da velocidade longitudinal, transversal e vertical, respetivamente.

As parcelas da Equação (2.3) são descritas do seguinte modo: $\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ que equivale às forças de inércia, g_i que representa as forças gravíticas, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$ é as forças devido a pressão e $\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$ corresponde às forças gravíticas.

As variáveis associadas aos escoamentos turbulentos apresentam-se como aleatórias, pois existe uma incoerência entre a natureza aleatória destes escoamentos e a essência determinista das equações do movimento. Nos escoamentos há inevitavelmente variações das condições iniciais (propriedades dos materiais e condições fronteira), e os escoamentos turbulentos mostram grande sensibilidade a essas perturbações. Esse âmbito e de modo a facilitar o seu estudo foram desenvolvidas as equações de Reynolds (Vaz, 2013).

2.5 Equações de Reynolds *Averaged Navier-Stokes* (RANS)

As equações de Navier-Stokes descrevem as particularidades dos campos de velocidades de escoamentos turbulentos, em todas as escalas turbulentas. Em escoamentos turbulentos com superfície livre, as escalas da turbulência podem variar desde vórtices de pequena dimensão, da ordem de grandeza de pequenos grupos de moléculas de água, até vórtices de dimensão da ordem de grandeza da profundidade do escoamento. Estas equações, no entanto, tornam-se impraticáveis para qualquer problema da engenharia (Ricardo, 2008).

Conseqüentemente, para solucionar essas dificuldades conceberam-se as Reynolds *Averaged Navier-Stokes* (RANS). A base das equações RANS é fazer a análise do escoamento aos seus valores médios temporais e respectivas flutuações ao longo do tempo, e tem gênese nas equações de Navier-Stokes. A decomposição de Reynolds consiste na separação do valor instantâneo das variáveis do escoamento numa componente média temporal e numa componente de flutuação.

A decomposição de Reynolds apresenta-se sob a forma de uma variável genérica θ do seguinte modo:

$$\theta(x, y, z, t) = \bar{\theta}(x, y, z, t) + \theta'(x, y, z, t) \quad (2.4)$$

em que $\bar{\theta}$ indica a média temporal e a θ' representa a flutuação temporal (Figura 2.9). É de salientar que a média das flutuações é nula:

$$\bar{\theta}' = 0 \quad (2.5)$$

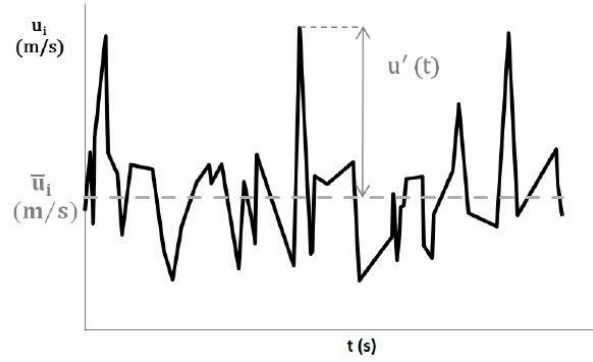


Figura 2.9: Flutuações de velocidade ao longo do tempo em escoamentos turbulentos

Quando aplicada a decomposição de Reynolds às variáveis do escoamento e o operador média temporal às diversas parcelas das equações de Navier-Stokes, obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.6)$$

Como foi previamente referido as variáveis envolvidas neste tipo de escoamentos são consideradas aleatórias, o que motiva a necessidade de recordar algumas das propriedades de variáveis aleatórias. Se X e Y forem duas variáveis aleatórias do escoamento, é possível verificar as seguintes expressões de relação: $X = \bar{X} + X'$; $\bar{X} = \bar{X}$; $\overline{X \cdot Y'} = 0$; $\frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial s^2} = \frac{\partial^2 X}{\partial s^2}$;
 $\overline{X + Y} = \bar{X} + \bar{Y}$; $\overline{X \cdot Y} = \bar{X} \cdot \bar{Y} + \overline{X' \cdot Y'}$; $\overline{X \cdot Y} = \bar{X} \cdot \bar{Y}$; $\frac{\partial \bar{X}}{\partial s} = \frac{\partial X}{\partial s}$.

Uma vez que g_i não tem flutuação turbulenta e ρ é constante, a Equação (2.6) resulta na seguinte forma:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.7)$$

E empregando seguidamente a decomposição de Reynolds fica:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \overline{u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.8)$$

Desenvolvendo a Equação (2.8) a partir das relações entre as variáveis aleatórias mencionadas obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \overline{u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.9)$$

Relacionando a Equação (2.3) e a Equação (2.9) depreende-se que praticamente todas as parcelas das equações de Navier-Stokes foram substituídas pela devida média temporal nas RANS e surge a parcela das tensões de Reynolds. Esta parcela representa o efeito médio do transporte de quantidade de movimento pelas flutuações de velocidade (Brederode, 1997).

A parcela das flutuações pode resumir-se à derivada (Equação (2.9)), e deduz-se a partir da Equação da Continuidade (Equação (2.11))

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) = \overline{u'_i \frac{\partial u'_j}{\partial x_j}} + \overline{u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \quad (2.10)$$

Para valores instantâneos, a equação da continuidade, é escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.11)$$

e para escoamentos com fluidos incompressíveis simplifica-se a equação anterior:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.12)$$

A Equação (2.11) quando é aplicada a valores médios apresenta-se do seguinte modo:

$$\overline{\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho}{\partial t}} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho} (\bar{u}_j + u'_j)] + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} \quad (2.13)$$

Uma vez que ρ é constante, a equação da continuidade para valores médios em escoamentos incompressíveis representa-se:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.14)$$

Quando se multiplica a Equação (2.11) (equação da continuidade) pelo valor médio da velocidade segundo a direção i , obtém-se a seguinte expressão:

$$u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.15)$$

E, em valores médios empregando à posteriori a decomposição de Reynolds à Equação (2.15) vem:

$$u_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} + \overline{u'_i \frac{\partial u'_j}{\partial x_j}} = 0 \quad (2.16)$$

Contudo como demonstrado pela equação da continuidade para valores médios, a primeira parcela do lado direito da Equação (2.16) é nula, logo:

$$u_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = \overline{u'_i \frac{\partial u'_j}{\partial x_j}} = 0 \quad (2.17)$$

Demonstra-se assim que a parcela das flutuações da Equação (2.9) se altera, modificando a forma final das RANS como é possível constatar na Equação (2.18) (Novais-Barbosa, 1985; Pope, 2000).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.18)$$

De forma simplificada, as diferenças entre as equações de Navier-Stokes (2.3) e as de Reynolds (2.18) distinguem-se pelo facto de estas últimas substituírem os valores instantâneos das primeiras por valores médios, e pela existência da parcela que traduz o efeito da turbulência do escoamento:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.19)$$

No enquadramento das RANS a parcela representada acima é muito importante. O tensor $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ é designado por o tensor das tensões de Reynolds (Vaz, 2013).

2.6 Intensidade turbulenta

A turbulência é caracterizada pela presença de vórtices em movimento, que são identificados por flutuações de velocidade do escoamento (u') ou simplesmente por flutuações turbulentas. A flutuação, indica quanto um registo da componente u da velocidade instantânea num ponto difere da velocidade média (\bar{u}) nesse ponto. A flutuação turbulenta da componente longitudinal do campo de velocidades é dado por

$$u'(t) = u(t) - \bar{u}(t) \quad (2.20)$$

onde u representa a velocidade instantânea do escoamento e \bar{u} representa a velocidade média no tempo.

O mesmo processo é aplicado para as componentes v e w .

A variação do valor da velocidade, em qualquer ponto, e em qualquer direção em torno de um valor médio, corresponde ao valor dessas flutuações. Segundo Cardoso (1998), o escoamento turbulento é caracterizado pela aleatoriedade, falta de organização, que se

sobrepõe a um movimento médio ao longo do tempo. A agitação aleatória é diretamente proporcional ao módulo de u' .

A intensidade turbulenta do vetor da velocidade em cada ponto do escoamento para cada uma das componentes, U_{rms} , V_{rms} e W_{rms} , é dada pela raiz quadrada da média dos quadrados da flutuação turbulenta, como se pode observa na Equação (2.21), para a componente longitudinal:

$$U_{rms} = \sqrt{\overline{u'(t)^2}} \quad (2.21)$$

2.7 Anisotropia do escoamento

A anisotropia existe em todos os escoamentos e caracteriza-se nos escoamentos turbulentos sob a forma de componentes do tensor de Reynolds com valores e distribuições diferentes. Nos escoamentos turbulentos a anisotropia pode ser analisada utilizando a técnica dos invariantes de anisotropia proposta por Lumley e Newman (1977). Esta técnica permite a caracterização da distribuição espacial do grau e natureza da anisotropia.

Lumley e Newman (1977) e Lumley (1978) apresentaram modelos de turbulência para o retorno à isotropia, que são em função da turbulência anisotrópica e do número de Reynolds. Estes autores propuseram a técnica do triângulo de Lumley, que se baseia na análise do tensor de anisotropia, b_{ij} , que é o resultado da decomposição do tensor de Reynolds em um termo isotrópico e anisotrópico. O nível de anisotropia da turbulência é descrito pelo tensor de anisotropia de tensão de Reynolds:

$$a_{ij} = \overline{u'_i u'_j} - \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij} \quad (2.22)$$

A forma adimensional do tensor de anisotropia, caracterizada no traço do tensor de tensão de Reynolds como o dobro da energia cinética da turbulência ($K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$), é dada por:

$$b_{ij} = \frac{\overline{u'_i u'_j}}{2K} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad (2.23)$$

onde, δ_{ij} é a função delta de Kronecker. Os invariantes de b_{ij} podem quantificar os diferentes estados de turbulência e a força relativa dos componentes de velocidade flutuante, ou seja, a componente do campo de turbulência. O tensor de anisotropia é um

tensor tridimensional, sendo que tem três invariantes independentes definidas como, $I = b_{ii}$, $II = \frac{(b_{ii}b_{jj}-b_{ii}^2)}{2}$ e $III = \frac{(b_{ii}b_{jj}b_{kk}-3b_{ii}b_{jj}^2+2b_{ii}^3)}{3!}$. É importante referir que, b_{ii}^2 é o traço de b_{ij}^2 e não de $b_{ii}b_{jj}$, e que b_{ii}^3 é o traço de b_{ij}^3 . Como o traço de b_{ij} é nulo, o cálculo das invariantes é simplificado e resulta em, $I = 0$, $II = \frac{-b_{ii}b_{jj}}{2}$ e $III = \frac{b_{ik}b_{kj}b_{ji}}{3}$.

Como se pode observar na Figura 2.10, os estados de turbulência devem localizar-se dentro do triângulo em coordenadas invariantes. O eixo -II representa o grau de anisotropia e o III a natureza da anisotropia (Lumley, 1978; Lumley e Newman, 1977). Os limites do triângulo de Lumley definem vários estados característicos de turbulência. A área dentro desses limites representa as condições turbulentas gerais e tridimensionais, e o vértice e a fronteira superior do triângulo correspondem à turbulência 1D e 2D na devida ordem. A turbulência isotrópica 3D corresponde à origem do gráfico (-II=0, III=0), onde as tensões de corte longitudinal, transversal e vertical são iguais. A transição de turbulência 3D para 1D é delimitada por um tipo de estrutura turbulenta em forma de cigarro (*cigar shape*), onde duas das componentes da flutuação de velocidade são idênticas e a terceira componente tem uma amplitude consideravelmente mais elevada, esta turbulência é designada por expansão axissimétrica. A transição de 3D para 2D é delimitada por uma estrutura turbulenta em forma de panqueca (*pancake shape*), onde duas das componentes da flutuação da velocidade são distribuídas uniformemente e com uma amplitude significativamente maior que a terceira componente, esta turbulência é designada por contração axissimétrica. Ambas as estruturas são consideradas estados de transição de turbulência (Mera *et al.*, 2015).

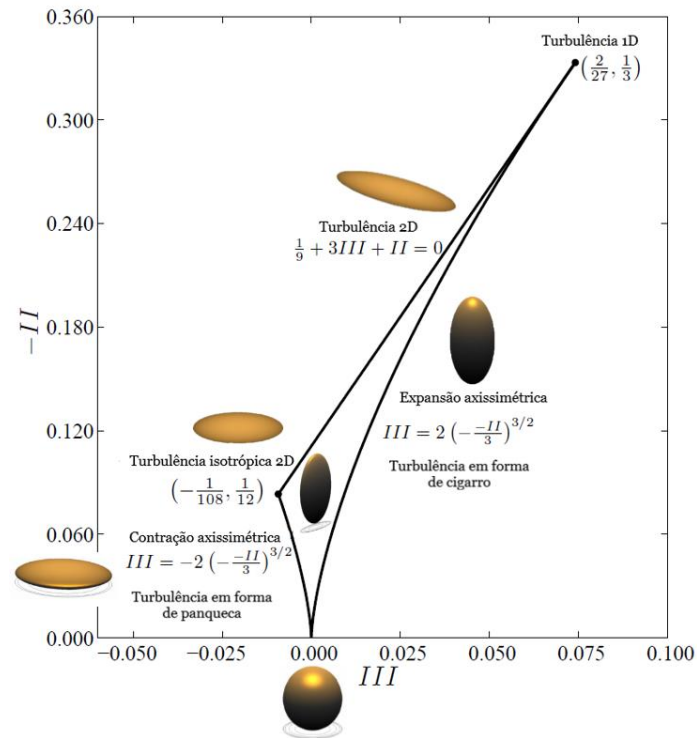


Figura 2.10: Limites dos valores do $-II$ e III invariantes do tensor de anisotropia de tensão de Reynolds e os possíveis estados de turbulência, apresentadas por Lumley (1978) (Hamilton e Cal, 2014)

Capítulo 3 – Instalação experimental e equipamentos de medição

3.1 Considerações gerais

No presente capítulo, encontra-se a descrição da instalação experimental e dos equipamentos de medição utilizados nos ensaios laboratoriais realizados no presente trabalho. Este, foi realizado no canal de Estruturas Hidráulicas, existente no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas (LHFE), do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), da Universidade da Beira Interior (UBI).

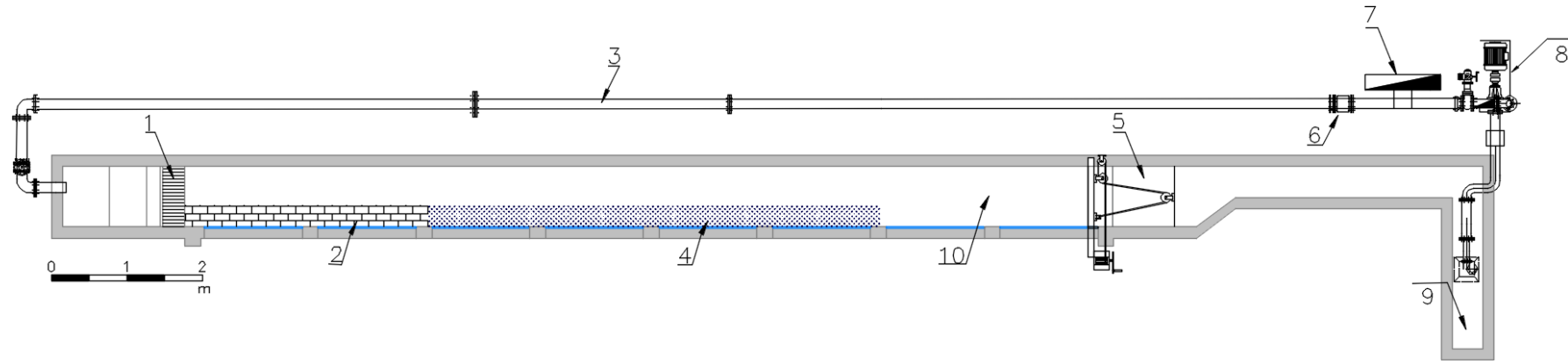
Conforme referido no Capítulo 1, o objetivo geral desta dissertação é o estudo da hidrodinâmica de escoamento turbulentos na interface entre áreas com vegetação e áreas sem vegetação. Deste modo, o trabalho experimental desenvolvido, tem em vista a obtenção de dados de velocidades instantâneas que permitam a referida caracterização.

3.2 Descrição do canal de Estruturas Hidráulicas

O canal de Estruturas Hidráulicas, utilizado no âmbito deste trabalho, é prismático, de secção transversal retangular, tem cerca de 11,60 m de comprimento, 1,00 m de altura e 0,80 m de largura, sendo constituído essencialmente por uma estrutura de betão. A parede lateral direita é constituída por 8 painéis de vidro que permitem a visualização do escoamento ao longo do canal, como se pode observar na Figura 3.1. Na Figura 3.2, encontra-se representada a respetiva planta.



Figura 3.1: Vista exterior do canal



- | | |
|---|---|
| 1. Tranquilizador de escoamento; | 6. Medidor de caudal electromagnético; |
| 2. Tijolos; | 7. Quadro elétrico; |
| 3. Circuito de alimentação do canal estreito PVC
$\Phi 120$; | 8. Grupo eletrobomba; |
| 4. Hastes; | 9. Tanque de alimentação; |
| 5. Comporta pendular; | 10. Canal. |

Figura 3.2: Planta do canal de Estruturas hidráulicas

De uma maneira sucinta, o canal hidráulico é constituído pelo seguinte (Figura 3.3):

- a) Reservatório de alimentação;
- b) Canal;
- c) Bomba e Medidor de caudal eletromagnético.



Figura 3.3: Canal hidráulico: a) Reservatório; b) Canal; c) Bomba e medidor de caudal eletromagnético

O reservatório de alimentação, localiza-se a jusante do canal hidráulico, ao nível do piso do laboratório. Este tem forma paralelepípedica, com uma altura média de 0,70 m, uma largura de 0,5 m e com capacidade útil é de 3,5 m³.

À entrada do canal foi instalado um dispositivo de tranquilização do escoamento do tipo favo de abelha, constituído por tubos de PVC cilíndricos de 2,5 cm de diâmetro que garantem uma distribuição uniforme do escoamento e permitem tranquilizar a superfície livre em toda a largura do canal (Figura 3.4).



Figura 3.4: Entrada do canal, vista de jusante

Na extremidade jusante do canal, existe uma comporta pendular, que possibilita a regularização dos níveis de água e que é acionada manualmente por intermédio de um guincho com cabo e roldana (Figura 3.5).



Figura 3.5: Comporta pendular e guincho

O canal encontra-se equipado com dois carrinhos móveis (Figura 3.6) que se deslocam ao longo do comprimento útil do canal, apoiados em dois carris existentes na parte superior das paredes laterais do canal, e que servem de suporte aos equipamentos de medição, nomeadamente, o hidrómetro de ponta direita e o ADV (Velocímetro Doppler Acústico).



Figura 3.6: Carrinhos de apoio à medição

A instalação está equipada com um circuito hidráulico de alimentação independente, que pode movimentar caudais que variam entre 0 e $104 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. É constituído por um debitómetro eletromagnético, por uma conduta de PVC com 120 mm de diâmetro interno e um grupo eletrobomba (bomba centrífuga Pentax CM 65 – 125B).

3.3 Equipamentos de medição

No decorrer dos ensaios experimentais, procedeu-se à medição do caudal, de níveis da superfície livre do escoamento, de níveis do fundo do canal e de velocidades instantâneas do escoamento.

Seguidamente, encontram-se descritos de uma forma sucinta, os equipamentos de medição utilizados no trabalho experimental.

3.3.1 Medição do Caudal

O trabalho experimental foi realizado com o caudal máximo debitado pela eletrobomba instalada no circuito hidráulico de alimentação. Esse caudal foi de 29 ls^{-1} e foi medido com recurso a um caudalímetro eletromagnético instalado nesse circuito (Figura 3.7).



Figura 3.7: Caudalímetro eletromagnético instalado na tubagem do circuito de alimentação

3.3.2 Medição da altura do escoamento

Os níveis da superfície livre do escoamento e do fundo do canal foram medidos com um hidrómetro de ponta direita instalado no carrinho móvel (Figura 3.8). Através da diferença dessas medições foi possível obter as alturas do escoamento ao longo do canal.



Figura 3.8: Hidrómetro instalado no carrinho do canal

3.3.3 Medições das velocidades instantâneas do escoamento

A medição das velocidades instantâneas do escoamento nas três direções (longitudinal, transversal e vertical), foi realizada recorrendo a um sistema 3D de Velocimetria de Doppler Acústica (ADV Vectrino) (em terminologia inglesa *Acoustic Doppler Velocimeter*), desenvolvido pela Nortek. O equipamento utilizado encontra-se munido de uma sonda *downlooking* que permite a realização de medições no centro do volume de amostragem distanciado a 5 cm do sensor (Figura 3.9).

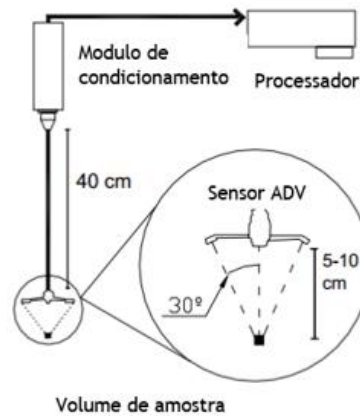


Figura 3.9: Sistema de aquisição de dados Nortek ADV

Este aparelho opera com recurso a um sistema de suspensão, a haste, que transmite ondas sonoras através da água, permitindo que as partículas existentes no escoamento reenviem de novo um som. O ADV Vetrino apoia-se no efeito Doppler para medir a velocidade, que consiste na diferença de som que se nota quando a origem do som ou do recetor estão em movimento. O ADV transmite uma onda curta, ouve os seus ecos e mede a diferença no som ou frequência do som que retorna. O ADV regista o som refletido nas partículas que se encontram suspensas na água, e se movem à mesma velocidade da água. Portanto, a velocidade medida é a velocidade própria da água (Barbosa, 2014).

O sensor acústico do ADV possui cinco transdutores - um emissor e quatro recetores (Figura 3.10) - e estes têm de estar totalmente submersos para que o aparelho consiga efetuar as respetivas leituras.

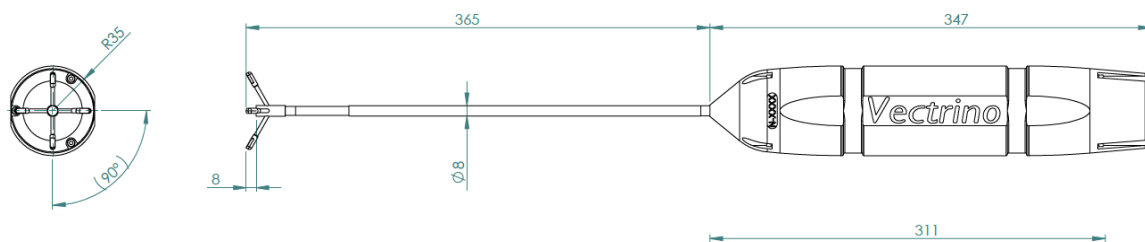


Figura 3.10: Pormenor construtivo do Vetrino Plus com downlooking (adaptado de Nortek (2009))

Quando as partículas existentes no escoamento não são suficientes para adquirir medições que levem a resultados fidedignos, de forma a melhorar o registo das velocidades instantânea, aumenta-se a concentração de partículas artificiais suspensas no escoamento, que acompanham o seu movimento, essas partículas são denominadas de *seeding*.

As partículas de *seeding* têm de ser pequenas e com densidade semelhante à do fluido para que acompanhem bem o movimento do escoamento, e devem ter uma dimensão suficiente para serem interceptadas pelo ADV. O *seeding* utilizado era constituído por água e pó de sílica.

Capítulo 4 – Procedimento experimental e tratamento de dados

4.1 Considerações gerais

Apresenta-se neste capítulo, a descrição do procedimento experimental adotado na realização da componente experimental da dissertação, desde a sua preparação até ao procedimento experimental propriamente dito, visando simular as condições de escoamento num canal parcialmente vegetado com vegetação emersa rígida.

Também neste capítulo se realiza o tratamento de dados de cada ensaio com o auxílio do *software WinADV*. Este *software* permite a visualização e o pós-processamento de dados com extensão “.adv”. Esta extensão é um dos formatos de dados associados ao ADV.

Como em qualquer equipamento de medição, as medições efetuadas com o ADV estão sujeitas a ruído. O programa *WinADV* aplica um algoritmo de filtragem de dados desenvolvido por Wahl (2002) baseado no método desenvolvido por Goring e Nikora (2002), que se intitula de *Phase-Space Thresholding Method*. Após a conclusão deste processo, os dados podem ser utilizados para definir os campos de velocidade médias no tempo das componentes u, v e w , e de seguida determinar as tensões de Reynolds e a anisotropia.

4.2 Procedimento experimental

Neste subcapítulo apresentam-se as condições em que foi desenvolvido o trabalho laboratorial, descrevendo-se os procedimentos utilizados na sua preparação e realização de modo a atingir os objetivos propostos, nomeadamente, a preparação do canal, a caracterização das secções de análise e, por último, os procedimentos utilizados na medição das velocidades instantâneas.

- Preparação do canal

Inicialmente preparou-se o leito do canal, forrando o seu fundo com placas retangulares de PVC com 1,0 cm de espessura. Posteriormente, procedeu-se à construção do corredor

com vegetação, no lado direito do canal, tendo-se para o efeito, cravado tubos metálicos com 1,0 cm de diâmetro, numa largura de 30,0 cm, e dispostos de forma regular, como é possível observar na Figura 4.1. As hastes foram dispostas numa matriz escalonada, sendo fixados um total de 810 tubos metálicos no leito do canal e colocadas com uma densidade homogénea de 135 hastes/m².

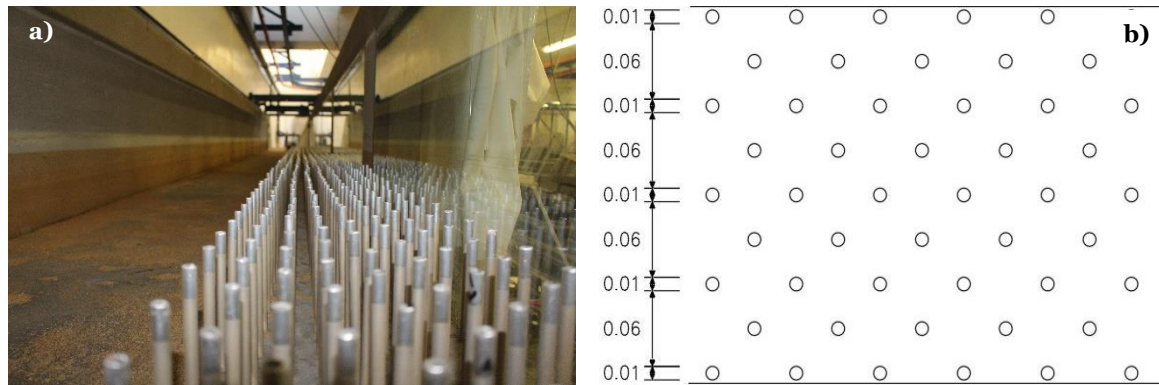


Figura 4.1: a) Vista de montante do canal com os tubos metálicos; b) matriz dos tubos metálicas

- Caracterização da profundidade do escoamento e definição das secções de estudo

Concluída a preparação do canal, caracterizou-se a profundidade do escoamento, definiram-se as secções transversais de estudo e seguidamente mediram-se as velocidades instantâneas.

No que diz respeito à caracterização da superfície livre do escoamento, foram realizadas várias medições ao longo do canal. Estabeleceram-se sete secções longitudinais definidas de SL1 a SL7, onde se mediu a altura do escoamento com afastamentos de 0,5 m, num comprimento de 9,5 m, perfazendo um total de 136 pontos de medição (Figura 4.2).

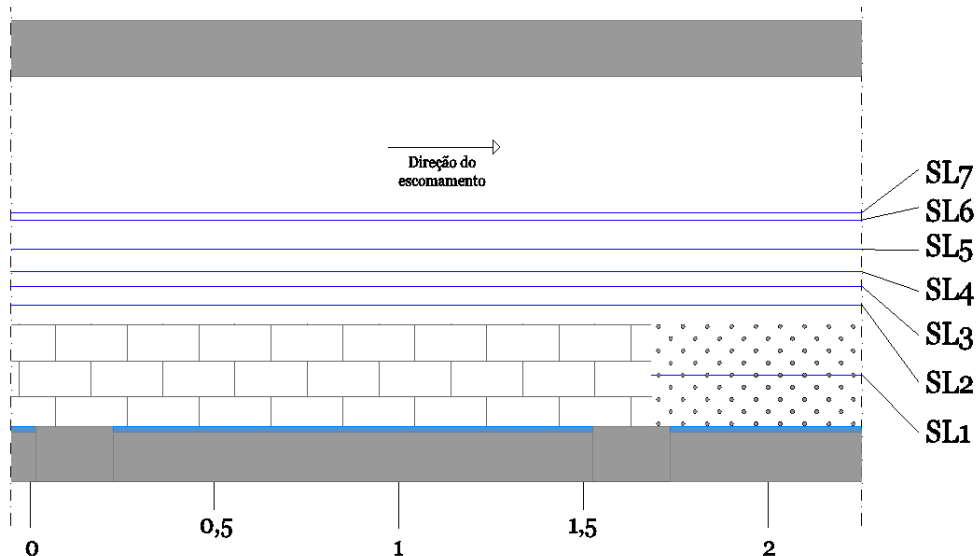


Figura 4.2: Pormenor da posição das secções onde foram medidas as alturas da superfície livre

Na Figura 4.3 representa-se a evolução da altura do escoamento, correspondendo no eixo das abcissas à distância $x=0,0$ m a secção imediatamente a jusante do dispositivo de tranquilização do escoamento. Tal como se previa, no troço inicial do canal o escoamento não se encontrava completamente desenvolvido, apresentando por isso uma variação nítida na profundidade do escoamento, aspeto que deixa de se verificar a partir de $x=5,5$ m, considerando-se, por isso, que a partir dessa secção o escoamento se encontra em equilíbrio uniforme. Aspeto que permitiu definir a localização das secções transversais de estudo.

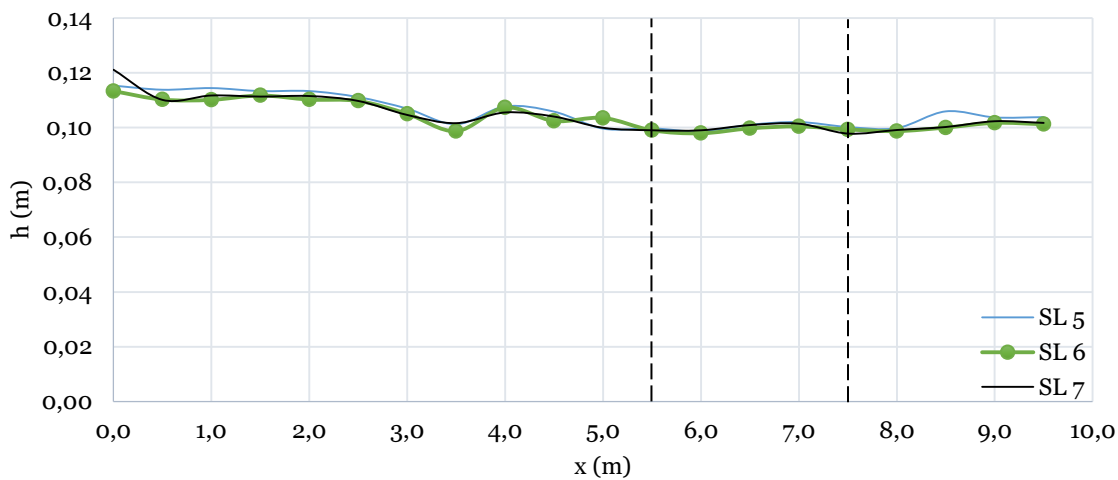


Figura 4.3: Evolução da altura do escoamento

Após a caracterização da superfície livre ao longo do canal, definiram-se as secções de estudo e os respetivos pontos de medições. Foram definidas três secções transversais designadas de ST8, ST9 e ST10, e as respetivas distâncias são apresentadas na Tabela 4.1.

Na Figura 4.4 apresenta-me um desenho esquemático correspondente à zona central do canal com a localização das secções longitudinais e transversais onde foram realizadas as medições da profundidade e da velocidade instantânea do escoamento.

Tabela 4.1: Distâncias das secções longitudinais e transversais dos níveis da superfície livre

	Secções longitudinais							Secções transversais		
	SL 1	SL 2	SL 3	SL 4	SL 5	SL 6	SL 7	ST 8	ST 9	ST 10
	y (m)							x (m)		
Distância (m)	0,14	0,33	0,38	0,42	0,48	0,56	0,58	6,00	6,50	7,00

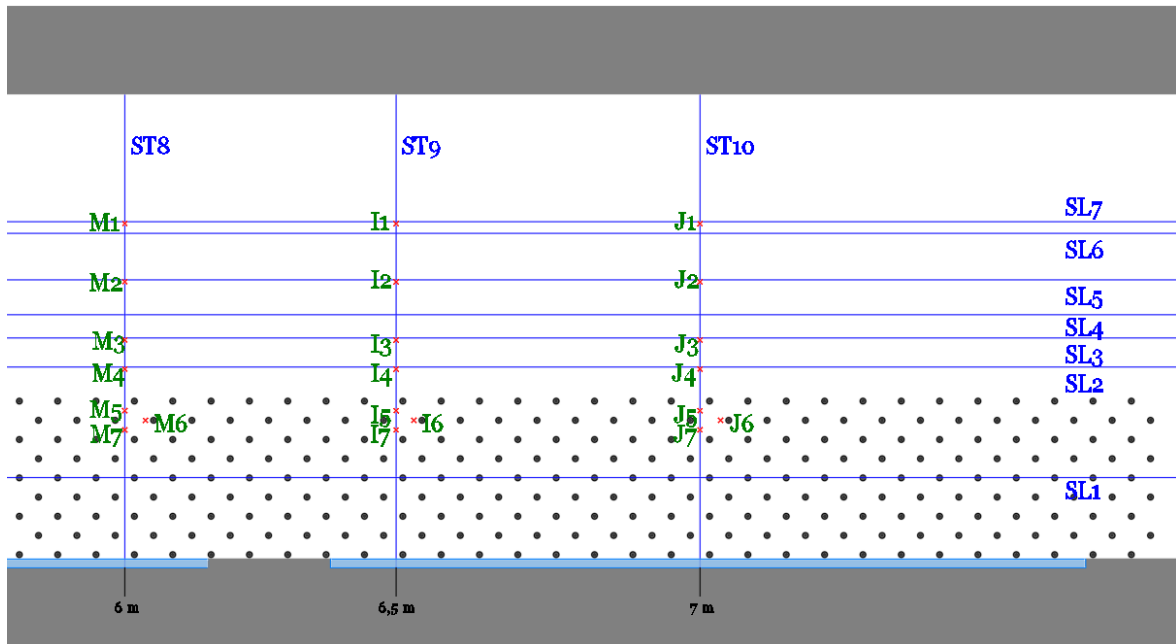


Figura 4.4: Desenho esquemático com a identificação das secções transversais e longitudinais de medição

Em seguida, passou-se à medição das velocidades instantâneas com recurso ao ADV, nos pontos de medição identificados por M1 a M7 na secção a montante ($x=6,0$ m), por I1 a I7 na secção intermédia ($x=6,5$ m) e por J1 a J7 na secção a jusante ($x=7,0$ m).

- Medição das velocidades instantâneas

Como já foi referido na subsecção 3.3.3, para a obtenção do registo das velocidades instantâneas por meio do ADV, introduziu-se *seeding* no escoamento. O *seeding* utilizado foi pó de sílica que tem uma densidade de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ e diâmetro mediano das partículas de $20 \text{ }\mu\text{m}$, sendo utilizada uma concentração de $2,5 \text{ mg l}^{-1}$. Posicionou-se um reservatório que continha uma mistura de *seeding*, a $0,3$ m de distância a montante dos respetivos pontos de medição, e durante cada medição, é inserida uma pequena quantidade de *seeding* no escoamento por gravidade. Esta quantidade de *seeding* tem que garantir uma densidade de partículas satisfatória na zona de teste.

Para a medição dos perfis verticais de velocidade, foi necessário garantir a verticalidade do ADV, e só depois foram realizadas oito medições por ponto para as alturas de $0,002$ m até $0,037$ m de $0,005$ m em $0,005$ m. Não foi possível efetuar medições acima dessa cota pois o ADV necessita de estar totalmente submerso para realizar leituras. Finelli *et al.* (1999 e Precht *et al.* (2006), recomendam que as medições efetuadas na camada de $0,01$ m de espessura situada logo acima do fundo podem não ser inteiramente corretas sendo crucial algum cuidado nessa região.

No *software Vectrino Plus* (Figura 4.5) foram definidas à priori as configurações para a realização das medições. Os ensaios tiveram uma duração total de 180 segundos, a uma frequência de 100 Hz, resultando num total de ≈ 17600 amostras. Aquando das medições procedeu-se à análise dos dados no programa *WinADV*, sendo necessário definir os parâmetros do *signal-to-noise* (SNR) e da correlação (COR), recomendado pelo fabricante do *software Vectrino Plus*, os valores recomendados são superiores a 15dB e a 70%, respetivamente.

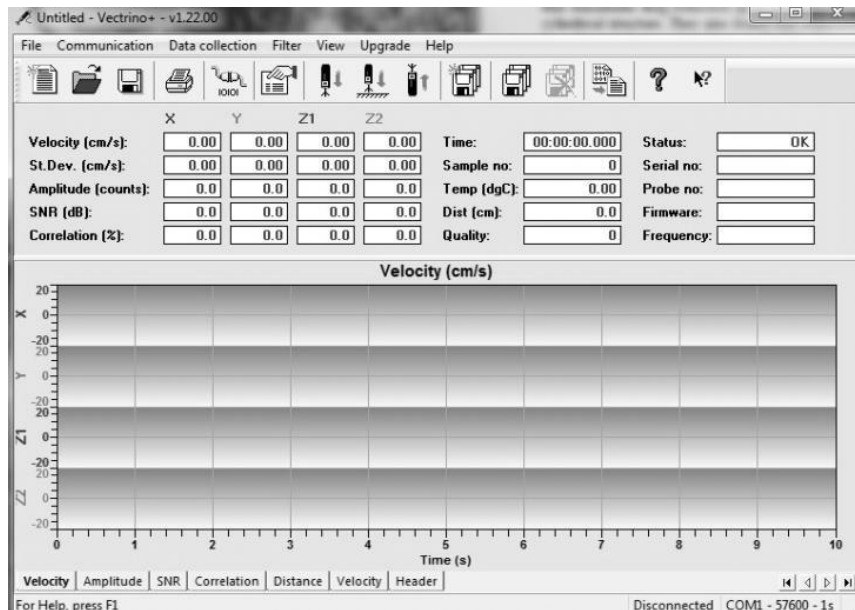


Figura 4.5: Janela do programa *Vectrino Plus*

4.3 Tratamento de dados

4.3.1 Filtragem dos dados das velocidades

As medições efetuadas com o ADV acarretam algumas desvantagens, como é o caso dos picos causados pelo efeito *Doppler*. Os picos de medição ocorrem quando a mudança de fase entre a saída e entrada do impulso se encontra fora do intervalo de -180° e $+180^\circ$.

Goring e Nikora (2002) desenvolveram um método para a eliminação dos picos, o *Phase-Space Thresholding Method* (PSTM), que é constituído por duas etapas, primeiro detetar o pico e de seguida substituí-lo. Este método apoia-se em três conceitos:

- A diferenciação de um sinal aumenta as componentes de elevada frequência;

- O máximo esperado de uma sequência de valores aleatórios é dado pelo parâmetro Universal, λ_U ;
- A nuvem de dados no espaço tridimensional é o conjunto dos dados válidos. Estes dados são utilizados para construir uma elipsoide no espaço tridimensional, em que os pontos que estão dentro são definidos pelo critério universal e os que se encontram fora da mesma são considerados picos.

O método PSTM é iterativo e é aplicado através dos seguintes passos:

1. Determina a primeira e segunda derivada das velocidades instantâneas a partir de:

$$\Delta u_i = \frac{u_{i+1} + u_{i-1}}{2} \quad (4.1)$$

$$\Delta^2 u_i = \frac{\Delta u_{i+1} + \Delta u_{i-1}}{2} \quad (4.2)$$

onde Δu_i é a primeira derivada de u_i e $\Delta^2 u_i$ é a segunda derivada de u_i .

2. Calcula o desvio-padrão das três variáveis, σ_u , $\sigma_{\Delta u}$ e $\sigma_{\Delta^2 u}$ e posteriormente o máximo esperado utilizando o critério Universal determinado por:

$$\lambda_U \hat{\sigma} = \sqrt{2 \ln(n)} \hat{\sigma} \quad (4.3)$$

onde $\hat{\sigma}$ é o desvio padrão estimado e n é o número da amostra.

3. Calcula o ângulo de rotação do eixo principal de $\Delta^2 u_i$ versus u_i utilizando a correlação cruzada:

$$\Theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sum u_i \Delta^2 u_i}{\sum u_i^2} \right) \quad (4.4)$$

onde Θ é o ângulo de rotação do eixo principal de $\Delta^2 u_i$ versus u_i .

4. Para cada par de variáveis, calcula o máximo e o mínimo da elipse de modo a que: para Δu_i versus u_i o eixo maior é $\lambda_U \sigma_u$ e o menor é $\lambda_U \sigma_{\Delta u}$; para $\Delta^2 u_i$ versus Δu_i o eixo maior é $\lambda_U \sigma_{\Delta u}$ e o eixo menor é $\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u}$ e para $\Delta^2 u_i$ versus u_i os eixos maior e menor, a e b , respetivamente, são soluções das seguintes equações

$$(\lambda_U \sigma_u)^2 = a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta \quad (4.5)$$

$$(\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u})^2 = a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta \quad (4.6)$$

onde σ_u , $\sigma_{\Delta u}$ e $\sigma_{\Delta^2 u}$ são os desvios padrão de u_i , Δu_i e $\Delta^2 u_i$, e a e b são os eixos maior e menor da projeção da elipse no plano $\Delta^2 u_i$ versus u_i .

5. Para cada projeção no espaço, identifica e substitui os pontos que estão fora da elipse.

Na Figura 4.6 apresenta-se um exemplo de aplicação do método *Phase-Space*.

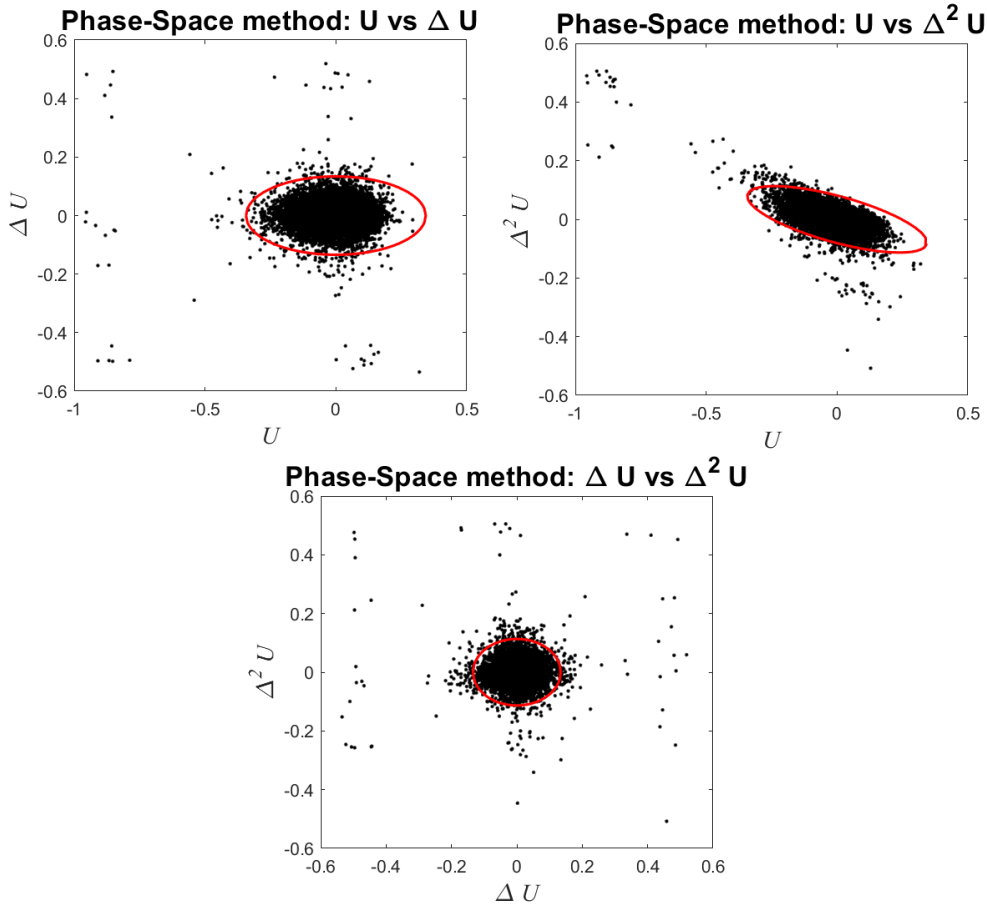


Figura 4.6: Método *Phase-Space* para o ponto I2 para $y = 0,032$ m

Wahl (2002) desenvolveu um algoritmo de filtragem de dados baseado no PSTM, e este foi incorporado no programa *WinADV*, um *software* utilizado para o processamento e análise de dados adquiridos pelo ADV, que foi utilizado para tratar os dados no presente estudo. Este algoritmo deteta os picos, eliminando-os em vez de os substituir, resultando num menor número de registos.

As Figuras 4.7 e 4.8, apresentam a série temporal da componente da velocidade longitudinal (u), para o ponto I2 posicionado na secção intermédia e a 32% da altura da água, antes e após a aplicação do filtro do programa *WinADV*.

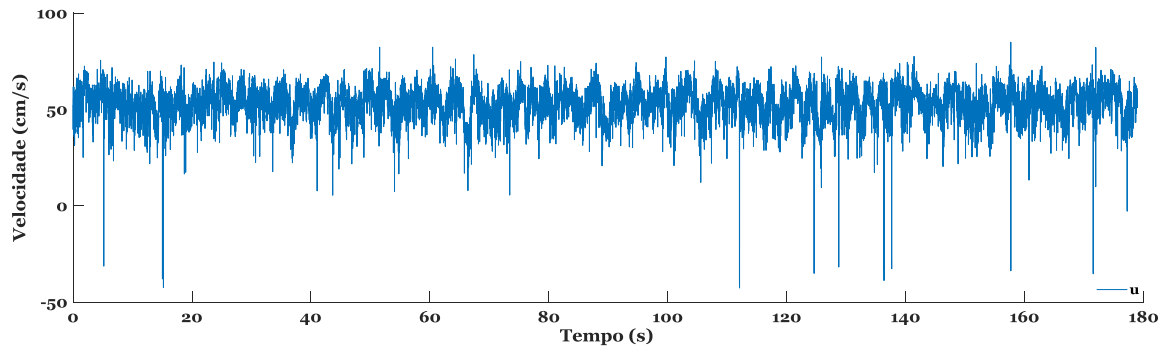


Figura 4.7: Série temporal da componente da velocidade longitudinal para o ponto I2 a $y=0,032$ m antes da aplicação do filtro no programa *WinADV*

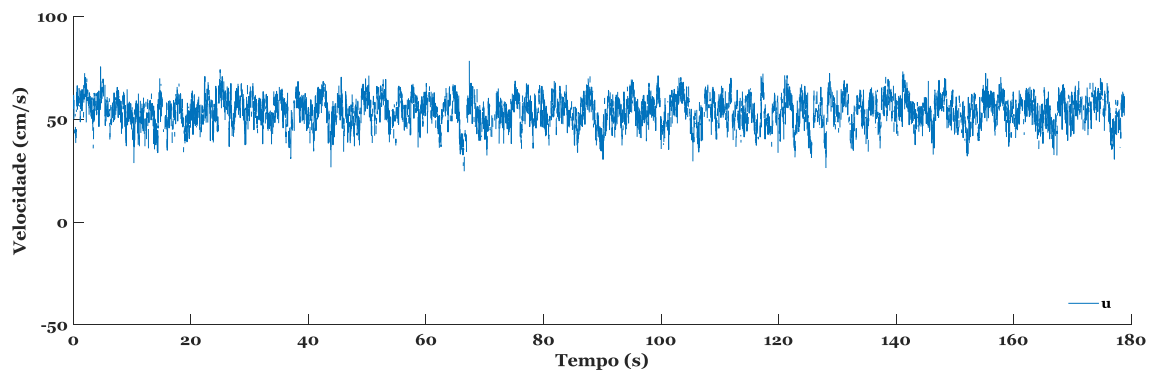


Figura 4.8: Série temporal da componente da velocidade longitudinal para o ponto I2 a $y=0,032$ m após a aplicação do filtro no programa *WinADV*

Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados

5.1 Considerações gerais

Este capítulo é dedicado à análise dos resultados no que diz respeito aos valores das velocidades, do tensor das tensões de Reynolds e da anisotropia.

5.2 Componente longitudinal da velocidade

5.2.1 Perfis verticais da velocidade longitudinal média temporal

Apresentam-se na Figura 5.1 os perfis verticais da velocidade longitudinal média temporal para cada ponto medido nas secções definidas como montante (a), intermédia (b) e jusante (c), e os respetivos perfis médios no espaço e no tempo para cada secção. Compila-se, ainda, na Figura 5.2 a totalidade dos perfis.

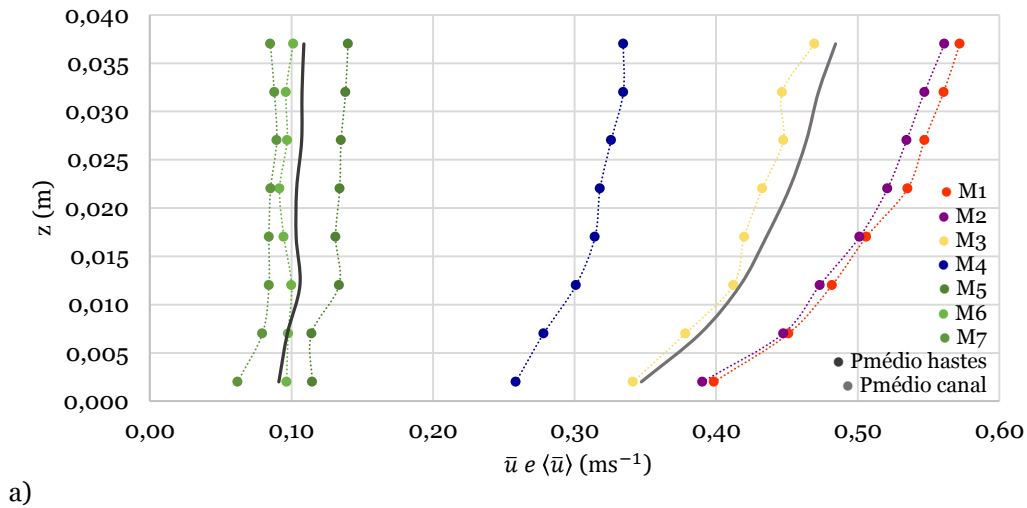


Figura 5.1: Perfis verticais médios temporais (\bar{u} linhas a ponteados) e perfis médios no espaço e no tempo ($\langle \bar{u} \rangle$ linhas contínuas) - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

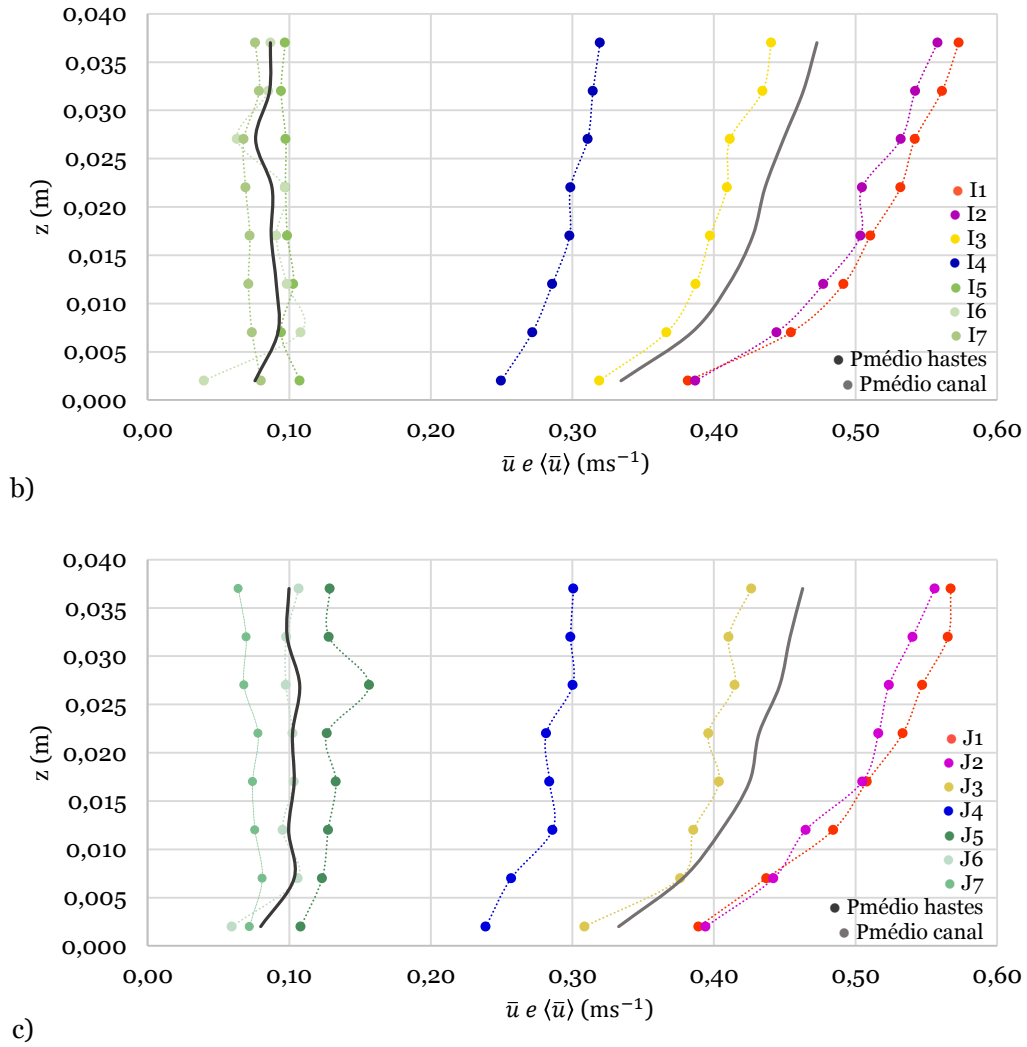


Figura 5.1 (cont.): Perfis verticais médios temporais (\bar{u} linhas a ponteados) e perfis médios no espaço e no tempo ($\langle \bar{u} \rangle$ linhas contínuas) - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

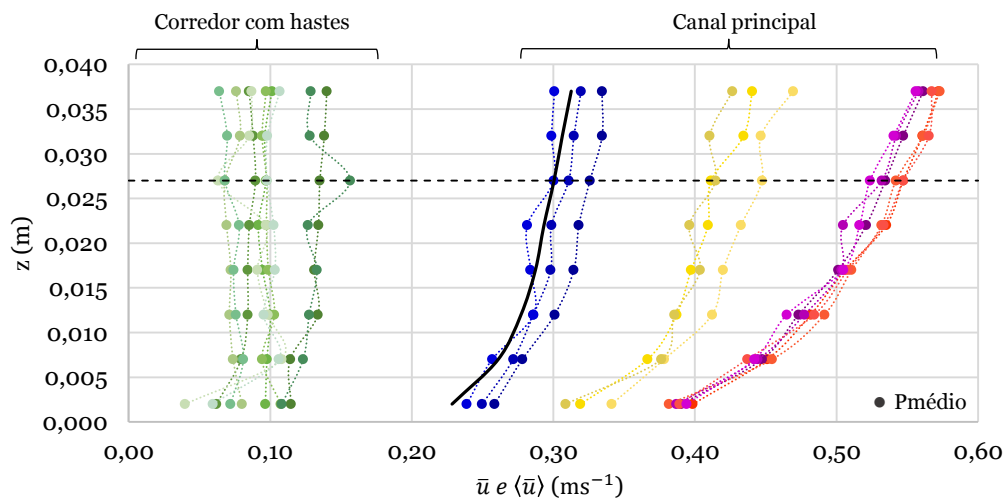


Figura 5.2: Compilação dos perfis verticais médios temporais (\bar{u} linhas a ponteados) e perfil médio no espaço e no tempo ($\langle \bar{u} \rangle$ linha contínua)

Tabela 5.1: Valores de \bar{u} (ms^{-1}) para os pontos em estudo

z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0,002	0,399	0,390	0,341	0,258	0,115	0,097	0,062
0,007	0,451	0,447	0,378	0,278	0,114	0,098	0,079
0,012	0,482	0,473	0,412	0,301	0,134	0,100	0,084
0,017	0,506	0,501	0,420	0,314	0,131	0,095	0,084
0,022	0,535	0,521	0,433	0,318	0,134	0,092	0,085
0,027	0,547	0,534	0,447	0,326	0,135	0,097	0,090
0,032	0,561	0,547	0,447	0,334	0,138	0,096	0,088
0,037	0,572	0,561	0,469	0,334	0,140	0,101	0,085
z (m)	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,002	0,382	0,387	0,319	0,250	0,107	0,040	0,080
0,007	0,454	0,444	0,367	0,272	0,094	0,108	0,074
0,012	0,492	0,477	0,387	0,286	0,103	0,098	0,071
0,017	0,511	0,504	0,397	0,298	0,099	0,091	0,072
0,022	0,532	0,505	0,409	0,299	0,097	0,097	0,069
0,027	0,542	0,532	0,411	0,311	0,098	0,063	0,068
0,032	0,561	0,542	0,434	0,315	0,094	0,085	0,079
0,037	0,573	0,558	0,440	0,320	0,097	0,087	0,076
z (m)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
0,002	0,389	0,394	0,309	0,239	0,108	0,059	0,072
0,007	0,437	0,442	0,376	0,257	0,123	0,106	0,081
0,012	0,484	0,465	0,386	0,286	0,127	0,095	0,076
0,017	0,508	0,505	0,404	0,284	0,133	0,103	0,074
0,022	0,533	0,516	0,396	0,282	0,127	0,102	0,078
0,027	0,547	0,524	0,415	0,300	0,156	0,098	0,068
0,032	0,565	0,540	0,410	0,299	0,128	0,098	0,070
0,037	0,567	0,556	0,427	0,301	0,129	0,107	0,064

A análise das Figuras 5.1 e 5.2 juntamente com a Tabela 5.1 permite constatar que os perfis apresentam dois comportamentos diferenciados. Um associado ao corredor com hastes e outro associado ao canal principal. Este comportamento é passível de se verificar observando os pontos do M1 ao M4, I1 ao I4 e do J1 ao J4 para o canal principal e do M5 ao M7, I5 ao I7 e do J5 ao J7 para o corredor com hastes.

Da análise das velocidades no corredor com hastes é possível verificar uma velocidade praticamente constante em todos os perfis, tomando o valor médio de $0,10 \text{ ms}^{-1}$. Os pontos I6 e J5 não seguem o padrão dos restantes pontos, à profundidade correspondente a 27% da profundidade da água em relação ao fundo do canal ($z = 0,027 \text{ m}$). Estes pontos foram averiguados de novo no laboratório, e estes picos são uma consequência geométrica do efeito da reflexão sonora, devido ao tipo de material (hastes metálicas).

Através da Figura 5.1 a) e fazendo uma análise mais detalhada, é possível verificar que os pontos M5, M6 e M7 sofrem um acréscimo de velocidade em direção ao corredor principal. Este comportamento deve-se ao facto de o escoamento percorrer o caminho que lhe oferece menor resistência, havendo assim transferências de massa do corredor com hastes para o canal principal. De modo a visualizar esse comportamento foi injetado no escoamento, através de uma seringa, um corante laranja numa secção próxima do ponto de medição M7 como se pode observar na Figura 5.3. Este teste permitiu verificar que a quantidade de corante que permaneceu no corredor com hastes é residual e que, de facto, ele se encaminha para o canal principal, confirmando os fluxos de massa que ocorrem do corredor com hastes para o canal principal. Este comportamento é semelhante para as secções intermédia e a jusante.

Dentro do corredor ripícola, a formação de vórtices deve-se à separação da camada limite de cada haste. A forma como o corante se propaga na zona populada com cilindros é sugestiva de ser consequência das oscilações periódicas do escoamento na esteira de cada haste (Figura 5.3). Além destes vórtices gerados à escala do cilindro, o escoamento em estudo é caracterizado pela existência de vórtices Kelvin-Helmholtz desenvolvidos na camada de corte na interface do canal principal e da galeria ripícola. Os vórtices são responsáveis por fluxos significativos e podem transportar massa e quantidade de movimento ao longo do canal.

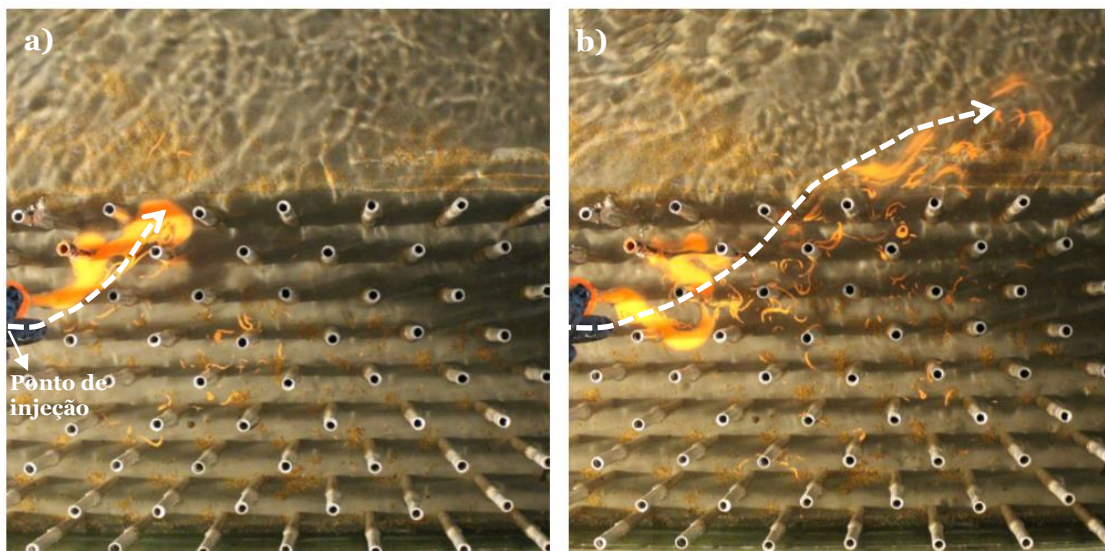


Figura 5.3: Visualização do escoamento (o escoamento ocorre da esquerda para a direita) – Vista de cima; a) $t=1$ s; b) $t=2$ s

Em sùmula, as velocidades no corredor com hastes podem considerar-se praticamente homogéneas na vertical e verifica-se que há uma diminuição da velocidade à medida que nos deslocamos para a margem direita das hastes. Na interface, zona de transição entre o

corredor com hastes e o canal principal, a velocidade tenderá a aumentar em consequência da diminuição da resistência ao escoamento. É possível observar que as velocidades são mais baixas junto ao leito, do que na região da superfície livre.

5.2.2 Distribuição transversal das velocidades médias no tempo e no espaço

Seguidamente, são apresentadas nas Figura 5.4 e Figura 5.5 a distribuição transversal da componente longitudinal das velocidades médias no espaço e no tempo nas secções a 6,0 m, 6,5 m e 7,0m para as oito alturas de medição e a distribuição transversal média respetivamente.

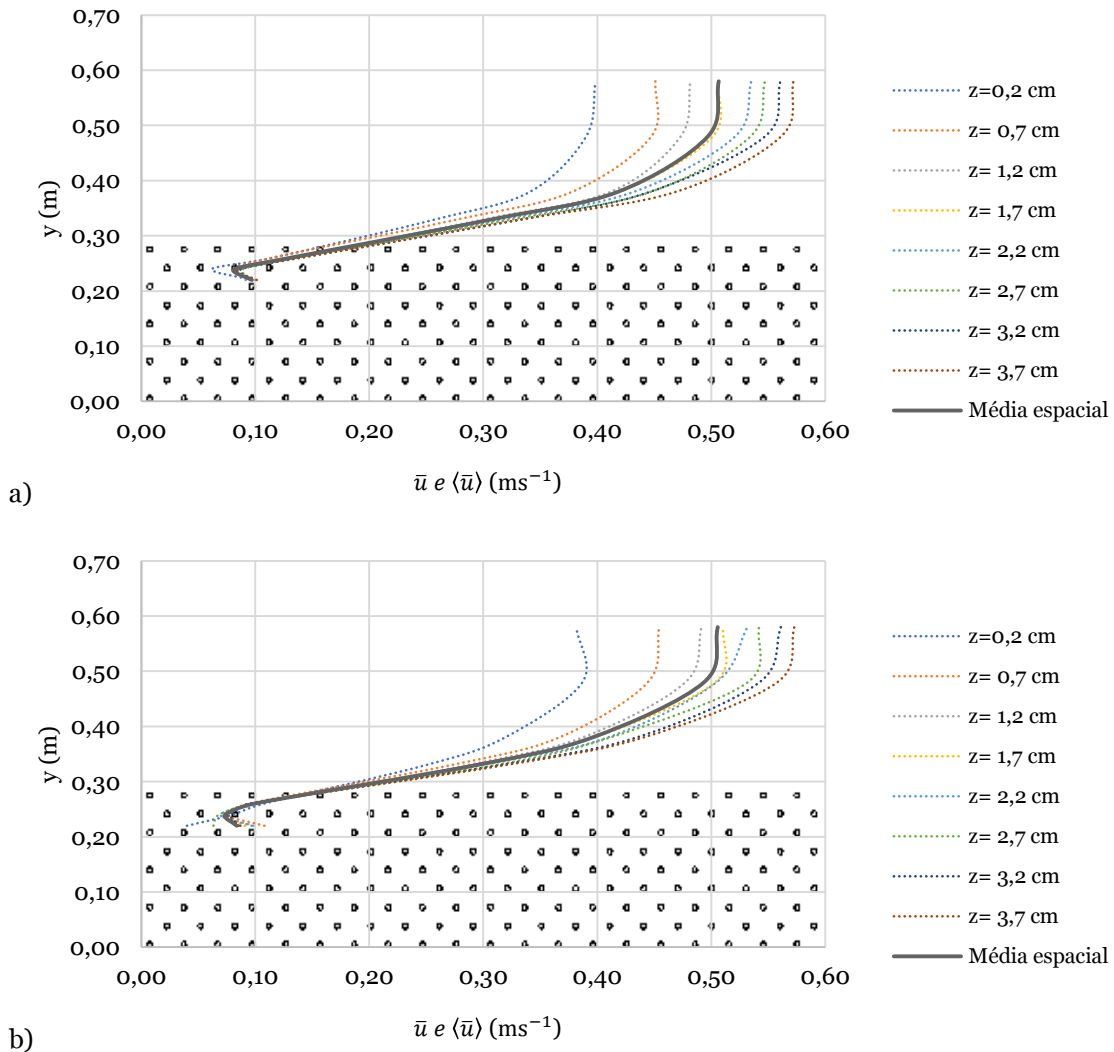


Figura 5.4: Distribuição transversal da componente longitudinal das velocidades médias no espaço e no tempo: a) secção a 6,0 m, b) secção a 6,5 m e c) secção a 7,0 m

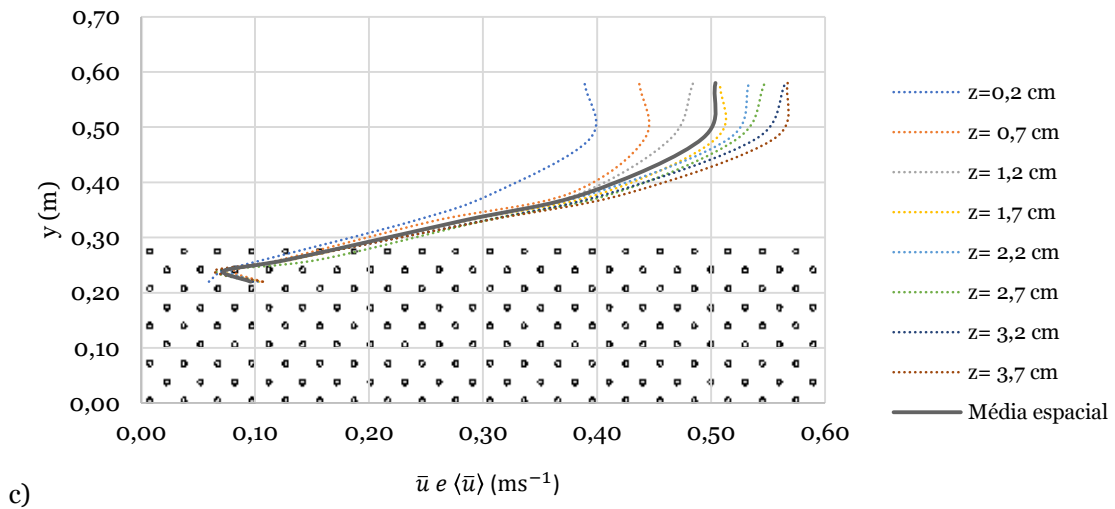


Figura 5.4 (cont): Distribuição transversal da componente longitudinal das velocidades médias no espaço e no tempo: a) secção a 6,0 m, b) secção a 6,5 m e c) secção a 7,0 m

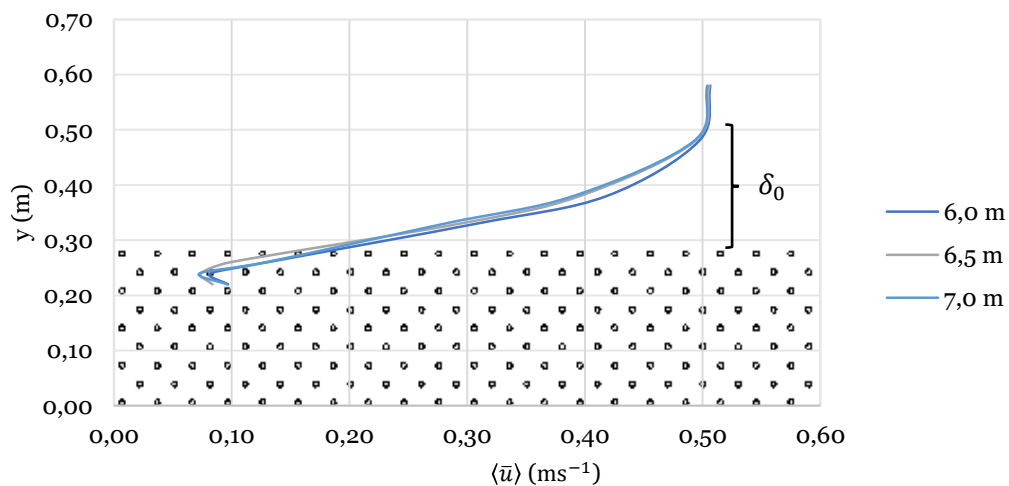


Figura 5.5: Distribuição transversal média da componente longitudinal das velocidades médias no espaço e no tempo nas três secções

A análise da Figura 5.4 permite constatar que o corredor com hastes influencia fortemente a componente longitudinal das velocidades do escoamento na sua proximidade. As velocidades tomam valores máximos compreendidos entre $\bar{u} \approx 0,39 \text{ ms}^{-1}$ e $\bar{u} \approx 0,57 \text{ ms}^{-1}$, na zona central do canal principal, para $y = 0,58 \text{ m}$, e valores mínimos compreendidos entre $\bar{u} \approx 0,03 \text{ ms}^{-1}$ e $\bar{u} \approx 0,09 \text{ ms}^{-1}$, no interior do corredor com hastes. Na zona de interface entre o canal principal e o corredor com hastes, para $y = 0,30 \text{ m}$, deixa de existir uma diferenciação nítida das velocidades em profundidade, uma vez que as linhas praticamente se sobrepõem para valores de $\bar{u} \approx 0,20 \text{ ms}^{-1}$. Ao longo desta zona, a tensão de corte é muito elevada como resultado da transição entre o escoamento mais rápido no canal principal e

o escoamento mais lento no canal com hastes. O perfil de velocidade ao longo desta camada interna da interface marca o mesmo ponto de inflexão e características estruturais de uma camada de mistura, como foi estudado na subsecção 2.2 e é possível verificar na Figura 2.2.

Através da Figura 5.4 é possível verificar que a velocidade da água sofre um aumento conforme a cota vai aumentando. A ordem de grandeza da velocidade da água próximo do fundo do canal ($z=0,2$ cm) na zona povoada com hastes é $\bar{u}\approx 0,07$ ms⁻¹ para $y=0,22$ m, e no canal principal a velocidade é $\bar{u}\approx 0,39$ ms⁻¹ para $y=0,58$ m. Nos pontos com a cota de $z=3,7$ cm, a cerca de meia altura, a velocidade toma valores de $\bar{u}\approx 0,10$ ms⁻¹ na zona das hastes para $y=0,22$ m, e $\bar{u}\approx 0,57$ ms⁻¹ no canal principal para $y=0,58$ m.

Por sua vez, a análise da Figura 5.5 permite verificar que a componente longitudinal das velocidades médias do escoamento apresenta um comportamento similar e os mesmos valores para as três secções de medição (secção a 6,0 m, secção a 6,5 m e secção a 7,0 m).

Da análise da Figura 5.5 pode concluir-se que a espessura da camada de corte na zona no canal principal, mantém-se constante nas três secções, sendo $\delta_0\approx 0,21$ m. Tendo em conta que as três secções apresentam a mesma espessura, podemos concluir que na zona escolhida para a realização das medições o escoamento está desenvolvido.

5.3 Componente transversal da velocidade

5.3.1 Perfis verticais da velocidade transversal média temporal

Apresentam-se na Figura 5.6 os perfis verticais médios temporais de velocidade transversal para cada ponto medido nas secções definidas como montante (a), intermédio (b) e jusante (c), e os respetivos perfis médios no espaço e no tempo para cada secção. Na Figura 5.7 faz-se a compilação de todos os perfis.

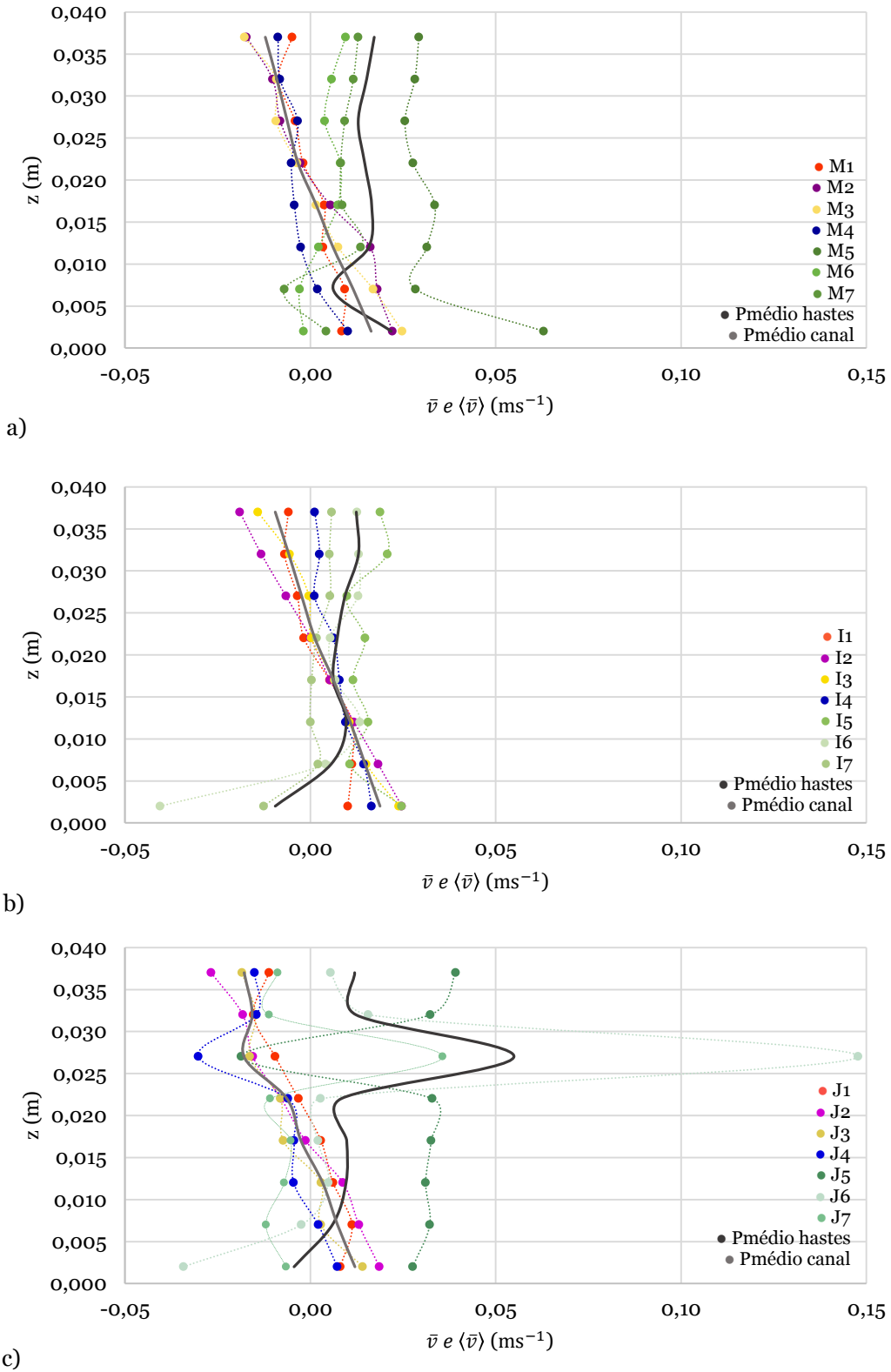


Figura 5.6: Perfis verticais médios temporais (\bar{v} linhas a ponteados) e perfis médios no espaço e no tempo ($\langle \bar{v} \rangle$ linhas contínuas) - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

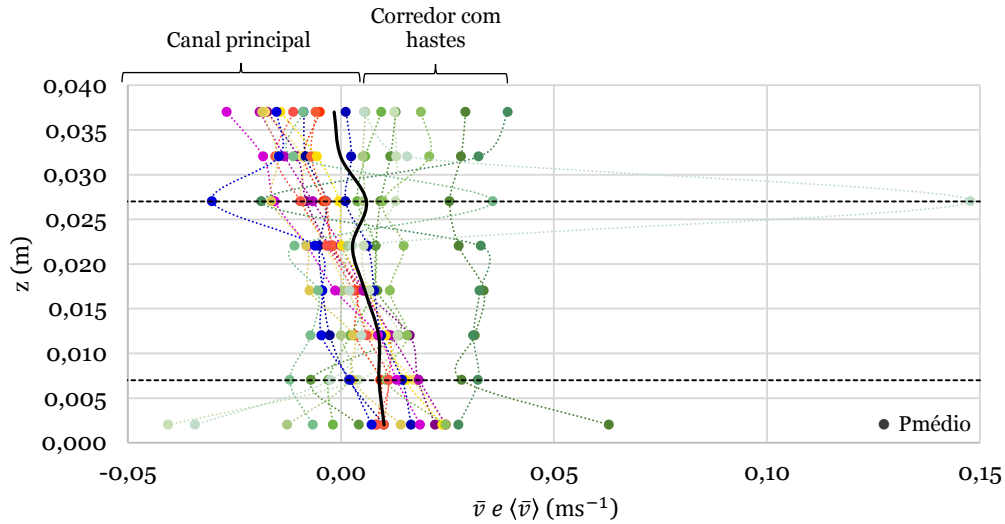


Figura 5.7: Compilação dos perfis verticais médios temporais (\bar{v} linhas a ponteados) e perfil médio no espaço e no tempo (\bar{v} linha contínua)

Tabela 5.2: Valores de \bar{v} (ms⁻¹) para os pontos em estudo

z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0,002	0,009	0,022	0,025	0,010	0,063	-0,002	0,004
0,007	0,009	0,018	0,017	0,002	0,028	-0,003	-0,007
0,012	0,003	0,016	0,007	-0,003	0,031	0,002	0,014
0,017	0,004	0,005	0,002	-0,004	0,034	0,007	0,009
0,022	-0,002	-0,003	-0,004	-0,005	0,028	0,008	0,008
0,027	-0,004	-0,008	-0,009	-0,003	0,026	0,004	0,009
0,032	-0,009	-0,010	-0,009	-0,008	0,028	0,006	0,012
0,037	-0,005	-0,017	-0,018	-0,009	0,029	0,010	0,013
z (m)	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,002	0,010	0,025	0,024	0,017	0,025	-0,041	-0,013
0,007	0,011	0,018	0,015	0,014	0,011	0,004	0,002
0,012	0,011	0,012	0,011	0,010	0,016	0,013	0,000
0,017	0,005	0,005	0,006	0,008	0,012	0,007	0,000
0,022	-0,002	0,000	0,000	0,006	0,015	0,005	0,002
0,027	-0,003	-0,007	0,000	0,001	0,010	0,013	0,005
0,032	-0,007	-0,013	-0,006	0,002	0,021	0,013	0,005
0,037	-0,006	-0,019	-0,014	0,001	0,019	0,013	0,006
z (m)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
0,002	0,008	0,019	0,014	0,007	0,028	-0,034	-0,007
0,007	0,011	0,013	0,003	0,002	0,032	-0,002	-0,012
0,012	0,006	0,009	0,003	-0,005	0,031	0,005	-0,007
0,017	0,003	-0,001	-0,007	-0,004	0,033	0,002	-0,005
0,022	-0,003	-0,008	-0,008	-0,006	0,033	0,003	-0,011
0,027	-0,010	-0,016	-0,016	-0,030	-0,019	0,148	0,036
0,032	-0,015	-0,018	-0,015	-0,015	0,032	0,016	-0,011
0,037	-0,011	-0,027	-0,018	-0,015	0,039	0,005	-0,009

Nas Figuras 5.6 e 5.7, apresentam-se os valores da velocidade transversal (\bar{v}) em função da altura (z), correspondentes aos pontos em estudo. A análise das Figuras 5.6 e 5.7 permite constatar que os perfis de velocidade transversal apresentam comportamentos diferenciados entre o canal principal e o corredor com hastes.

Como se pode observar na Figura 5.6 os perfis no corredor com hastes são na sua maioria positivos, portanto há um desvio do escoamento em direção ao canal principal. No canal principal a magnitude da velocidade transversal é pequena, e os perfis apresentam valores negativos a partir de $z=0,022$ m até à superfície e positivos dessa mesma altura até ao fundo do canal. Esta diferença de sinal em baixo e em cima pode evidenciar a presença de uma corrente secundária.

A velocidade transversal é significativamente menor em termos de magnitude no canal principal, e maior no corredor ripícola. Este comportamento deve-se ao facto de haver maior resistência ao escoamento dentro do canal ripícola, e menor no canal principal.

5.3.2 Distribuição transversal das velocidades médias no tempo e no espaço

Apresentam-se na Figura 5.8 a distribuição transversal da componente vertical das velocidades médias no tempo para as secções 6,0 m, 6,5 m e 7,0 m, respetivamente, e na Figura 5.9 a distribuição média de cada secção.

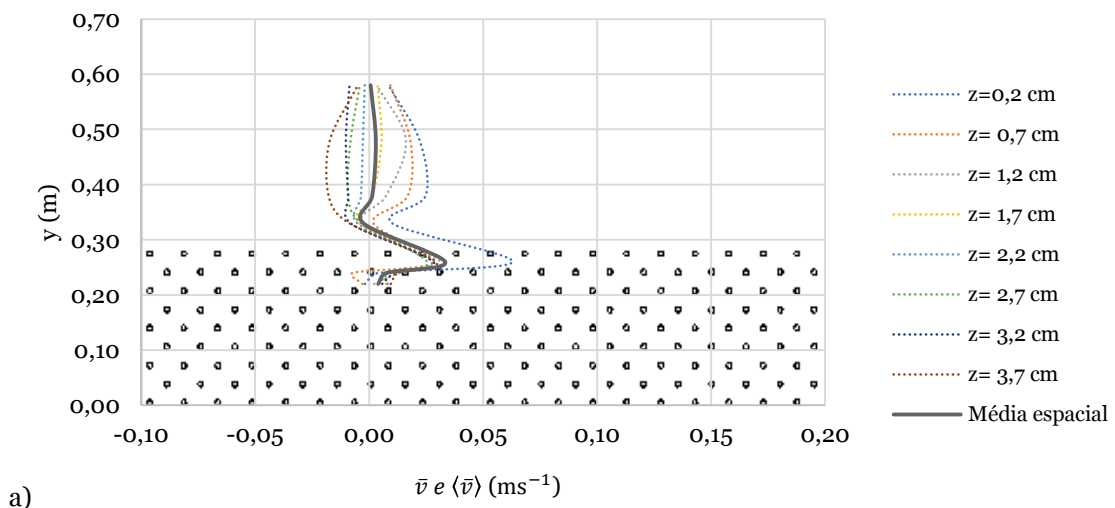


Figura 5.8: Distribuição transversal da componente transversal das velocidades médias no espaço e no tempo: a) secção a 6,0 m, b) secção a 6,5 m e c) secção a 7,0 m

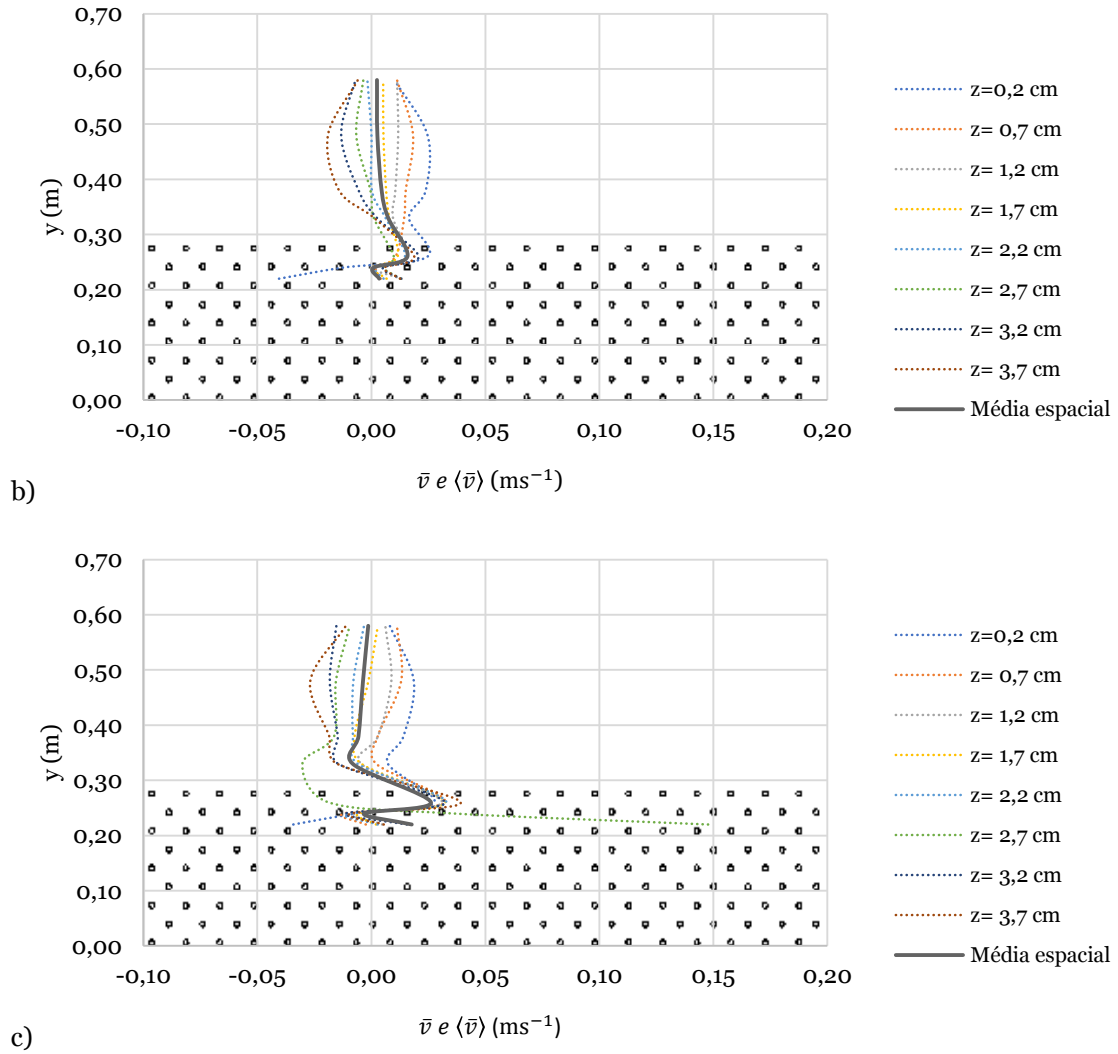


Figura 5.8 (cont): Distribuição transversal da componente transversal das velocidades médias no espaço e no tempo: a) secção a 6,0 m, b) secção a 6,5 m e c) secção a 7,0 m

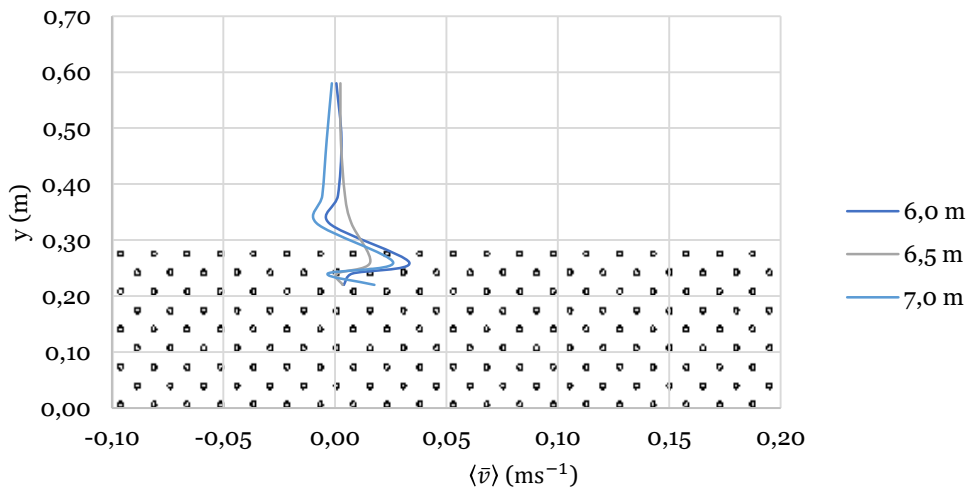


Figura 5.9: Distribuição transversal média da componente transversal das velocidades médias no espaço e no tempo nas três secções

Na Figura 5.8 representam-se os valores de \bar{v} em função de y , para as diferentes cotas (z), e na Figura 5.9 representam-se os valores de $\langle \bar{v} \rangle$ em função de y , para as três secções (montante, intermédia e jusante).

A análise da Figura 5.8 permite concluir que, no canal principal a velocidade transversal é maior junto ao leito, à cota $z=0,2$ cm, tomando um máximo no ponto M3 da ordem de $\bar{v}=0,02$ ms^{-1} , e menor conforme se aproxima da superfície, sendo que à cota $z=3,7$ cm atinge o valor máximo negativo de $\bar{v}=-0,03$ ms^{-1} no ponto J2.

A Figura 5.9 sugere que $\langle \bar{v} \rangle$ apresentam um comportamento semelhante para todas as secções, e é possível observar que no corredor com hastes a velocidade transversal varia mais que no canal principal onde tende para zero, isto deve-se à presença das hastes.

5.4 Componente vertical da velocidade

5.4.1 Perfis verticais da velocidade vertical média temporal

Com vista a completar a análise das componentes da velocidade do escoamento, é possível observar na Figura 5.10 os perfis verticais médios temporais de velocidade vertical para os pontos já enunciados e nas três secções definidas, e na Figura 5.11 faz-se a junção da totalidade dos perfis.

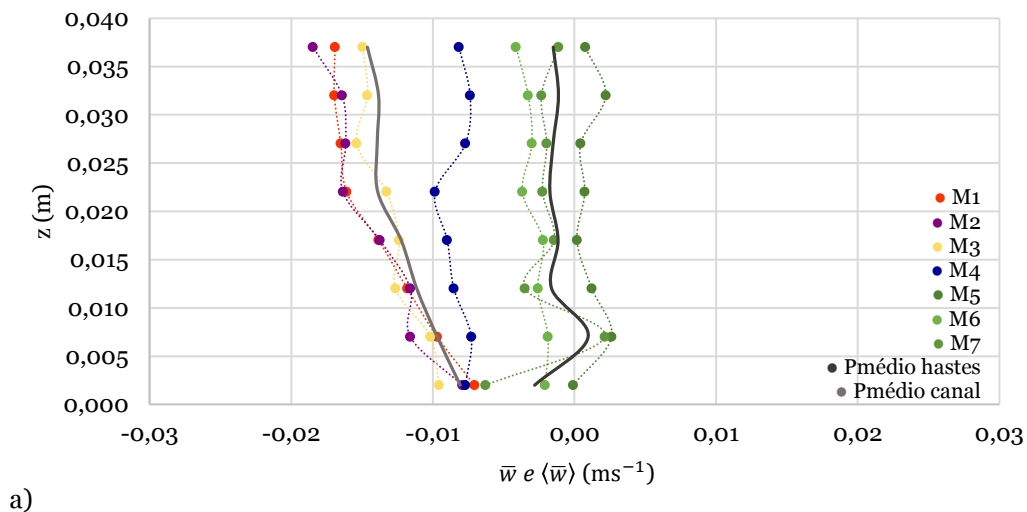


Figura 5.10: Perfis verticais médios temporais (\bar{w} linhas a ponteados) e perfis médios no espaço e no tempo ($\langle \bar{w} \rangle$ linhas contínuas) - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

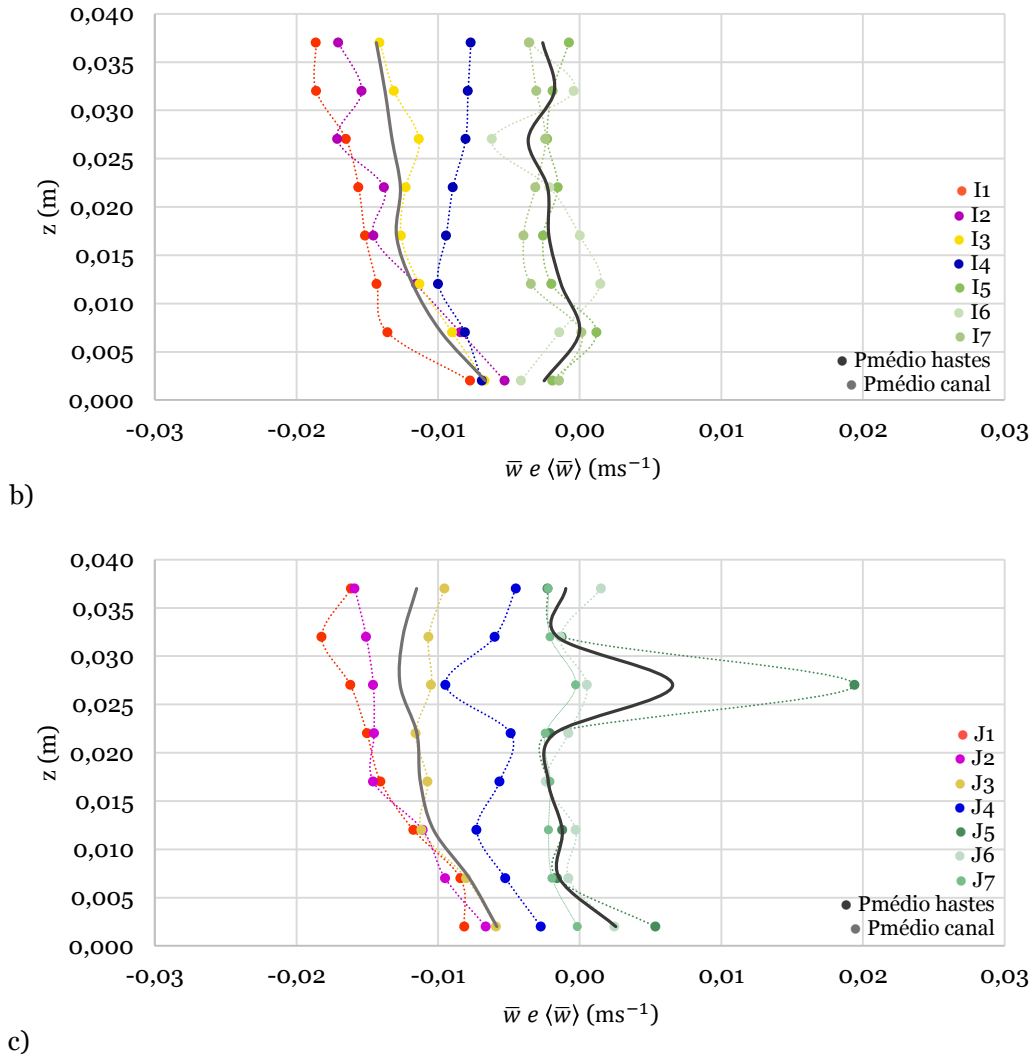


Figura 5.10 (cont.): Perfis verticais médios temporais (\bar{w} linhas a pontado) e perfis médios no espaço e no tempo ($\langle \bar{w} \rangle$ linhas contínuas) - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

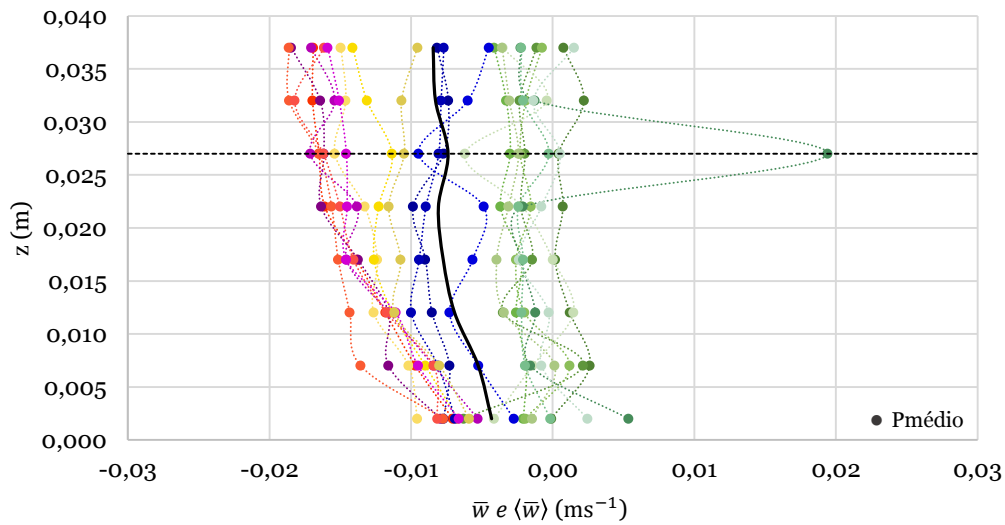


Figura 5.11: Compilação dos perfis verticais médios temporais (\bar{w} linhas a pontado) e perfil médio no espaço e no tempo ($\langle \bar{w} \rangle$ linha contínua)

Tabela 5.3: Valores de \bar{w} (ms^{-1}) para os pontos em estudo

z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0,002	-0,007	-0,008	-0,010	-0,008	0,000	-0,002	-0,006
0,007	-0,010	-0,012	-0,010	-0,007	0,003	-0,002	0,002
0,012	-0,012	-0,012	-0,013	-0,009	0,001	-0,003	-0,003
0,017	-0,014	-0,014	-0,012	-0,009	0,000	-0,002	-0,001
0,022	-0,016	-0,016	-0,013	-0,010	0,001	-0,004	-0,002
0,027	-0,017	-0,016	-0,015	-0,008	0,000	-0,003	-0,002
0,032	-0,017	-0,016	-0,015	-0,007	0,002	-0,003	-0,002
0,037	-0,017	-0,018	-0,015	-0,008	0,001	-0,004	-0,001
z (m)	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,002	-0,008	-0,005	-0,007	-0,007	-0,002	-0,004	-0,001
0,007	-0,014	-0,008	-0,009	-0,008	0,001	-0,001	0,000
0,012	-0,014	-0,012	-0,011	-0,010	-0,002	0,001	-0,003
0,017	-0,015	-0,015	-0,013	-0,009	-0,003	0,000	-0,004
0,022	-0,016	-0,014	-0,012	-0,009	-0,002	-0,002	-0,003
0,027	-0,016	-0,017	-0,011	-0,008	-0,002	-0,006	-0,002
0,032	-0,019	-0,015	-0,013	-0,008	-0,002	0,000	-0,003
0,037	-0,019	-0,017	-0,014	-0,008	-0,001	-0,004	-0,004
z (m)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
0,002	-0,008	-0,007	-0,006	-0,003	0,005	0,002	0,000
0,007	-0,008	-0,010	-0,008	-0,005	-0,002	-0,001	-0,002
0,012	-0,012	-0,011	-0,011	-0,007	-0,001	0,000	-0,002
0,017	-0,014	-0,015	-0,011	-0,006	-0,002	-0,002	-0,002
0,022	-0,015	-0,015	-0,012	-0,005	-0,002	-0,001	-0,002
0,027	-0,016	-0,015	-0,010	-0,009	0,019	0,001	0,000
0,032	-0,018	-0,015	-0,011	-0,006	-0,001	-0,001	-0,002
0,037	-0,016	-0,016	-0,010	-0,005	-0,002	0,002	-0,002

Analisando as Figuras 5.10 e 5.11 depreende-se que a componente vertical da velocidade possui valores muito próximos de zero. Através das figuras é possível observar a existência de pontos onde a velocidade vertical é negativa e noutros positiva. Este comportamento deve-se ao facto de o escoamento apresentar um carácter tridimensional.

As velocidades verticais positivas indicam que nem sempre o escoamento ultrapassa os obstáculos com velocidades descendentes. Da observação da Figura 5.11 é possível retirar que o movimento é preferencialmente de cima para baixo, pois o perfil médio (linha continua a preto) é caracterizado por valores negativos.

A análise da Figura 5.10 permite constatar que no canal principal os perfis são sempre negativos e sofrem um acréscimo de velocidade em módulo em direção ao centro do canal. No corredor com hastes o ponto M5 exhibe um perfil onde o movimento do escoamento é preferencialmente feito de baixo para cima.

5.4.2 Distribuição transversal das velocidades médias no tempo e no espaço

São apresentadas nas Figuras 5.12 e 5.13 a distribuição transversal da componente vertical das velocidades médias no tempo nas secções a 6,0 m, 6,5 m e 7,0m e a junção dos perfis da distribuição transversal média respetivamente.

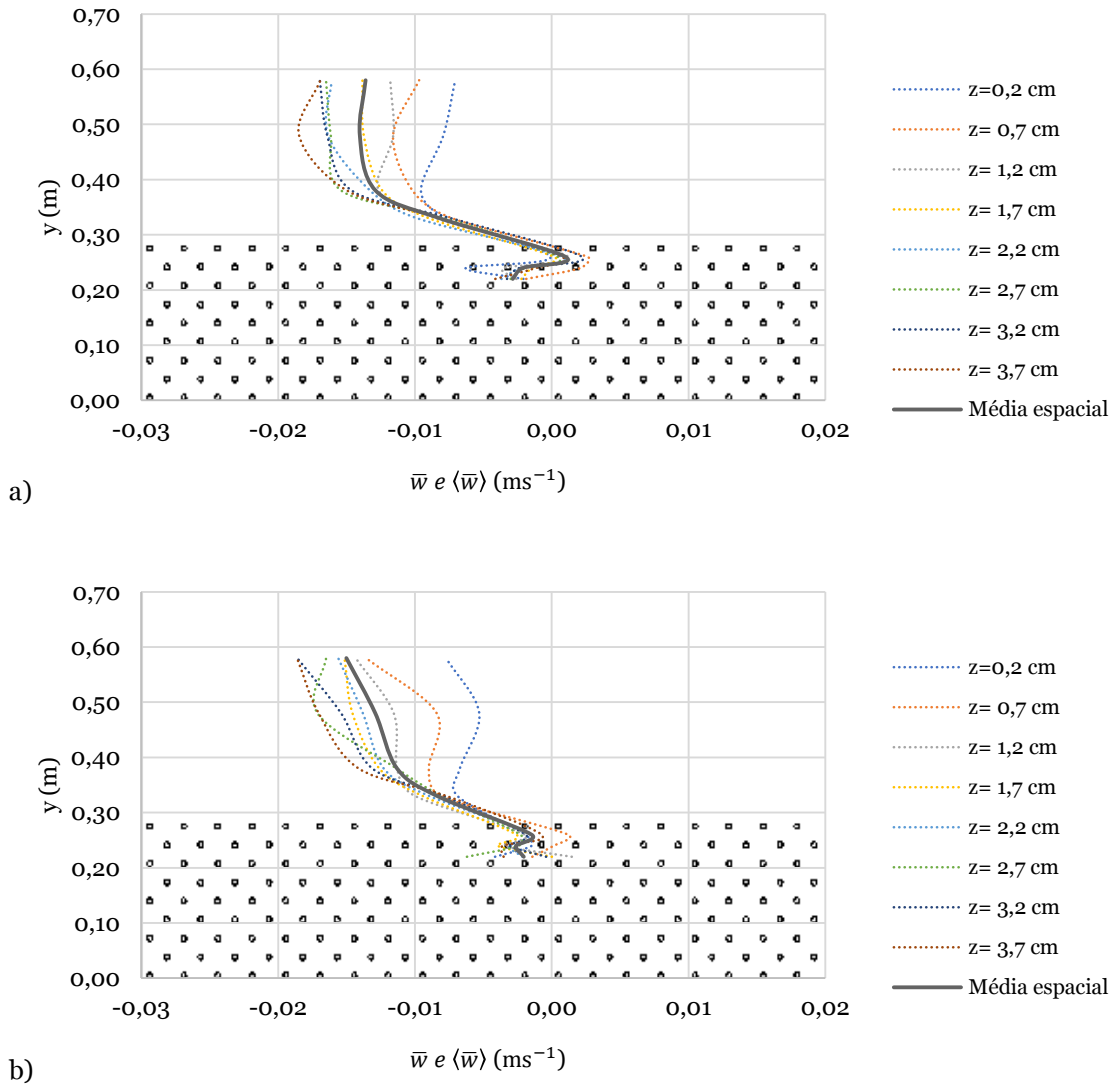
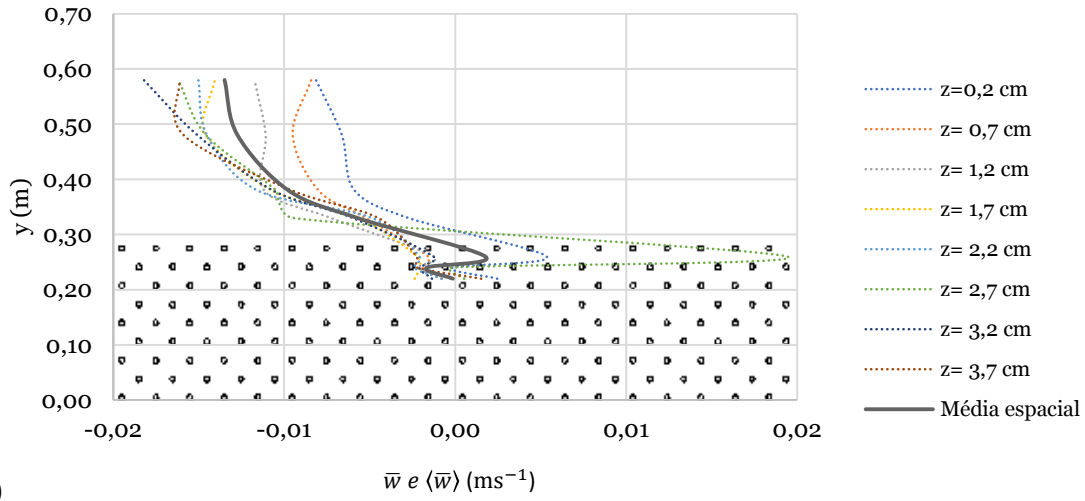


Figura 5.12: Distribuição transversal da componente vertical das velocidade médias no espaço e no tempo: a) secção a 6,0 m, b) secção a 6,5 m e c) secção a 7,0 m



c)

Figura 5.12 (cont.): Distribuição transversal da componente vertical das velocidades médias no espaço e no tempo: a) secção a 6,0 m, b) secção a 6,5 m e c) secção a 7,0 m

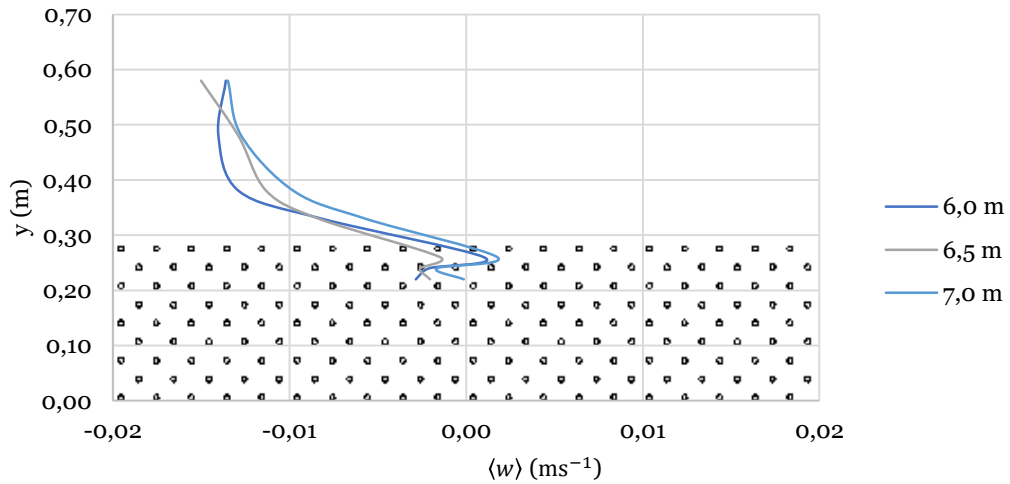


Figura 5.13: Distribuição transversal média da componente vertical das velocidades médias no espaço e no tempo nas três secções - montante, intermédio e jusante

Através da análise da Figura 5.12 é possível verificar que o escoamento no corredor com hastes apresenta oscilações nos perfis verticais das velocidades.

5.5 Tensões de Reynolds

5.5.1 Distribuição das tensões de corte horizontais

Na Figura 5.14 representam-se os valores de τ_{xy} em função de z correspondentes às três secções transversais em estudo. Apresenta-se na Tabela 5.4 os valores de τ_{xy} para cada ponto de medição.

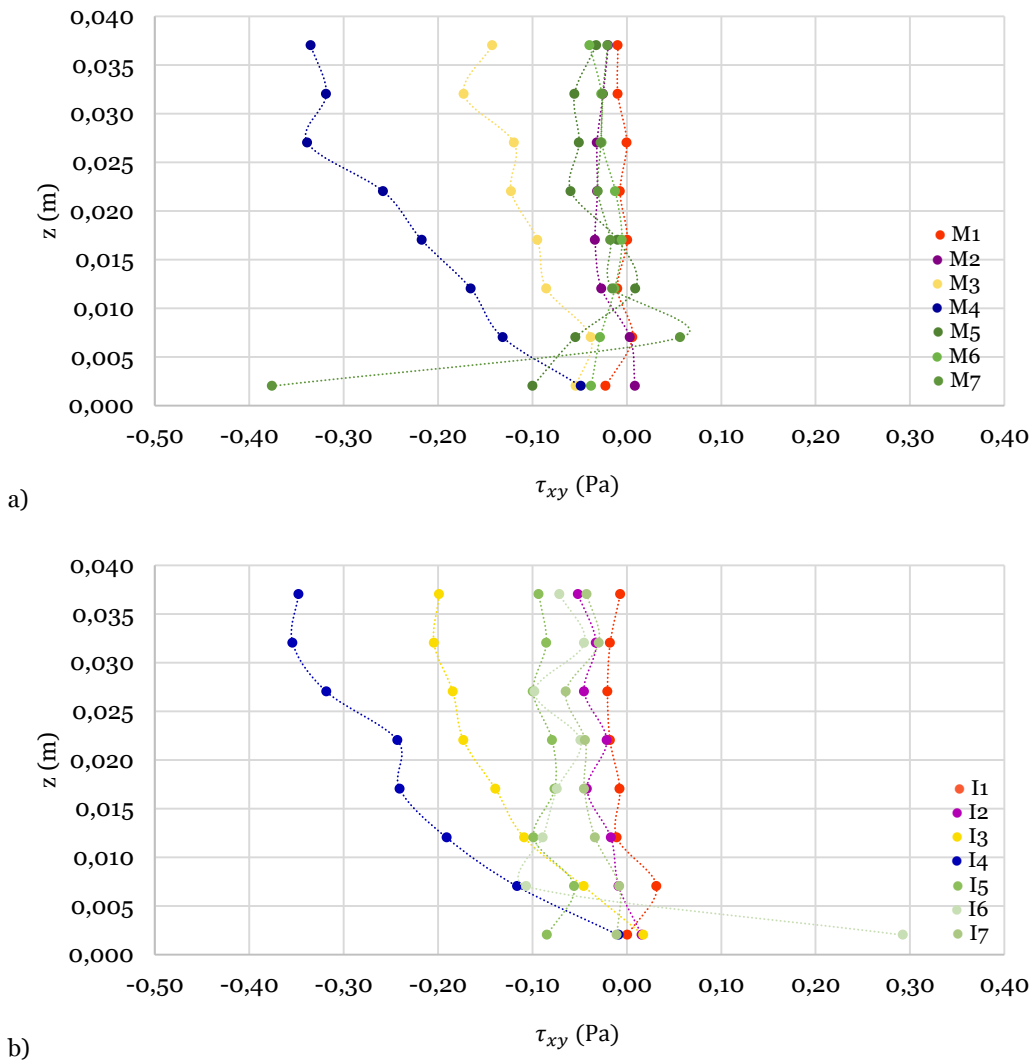
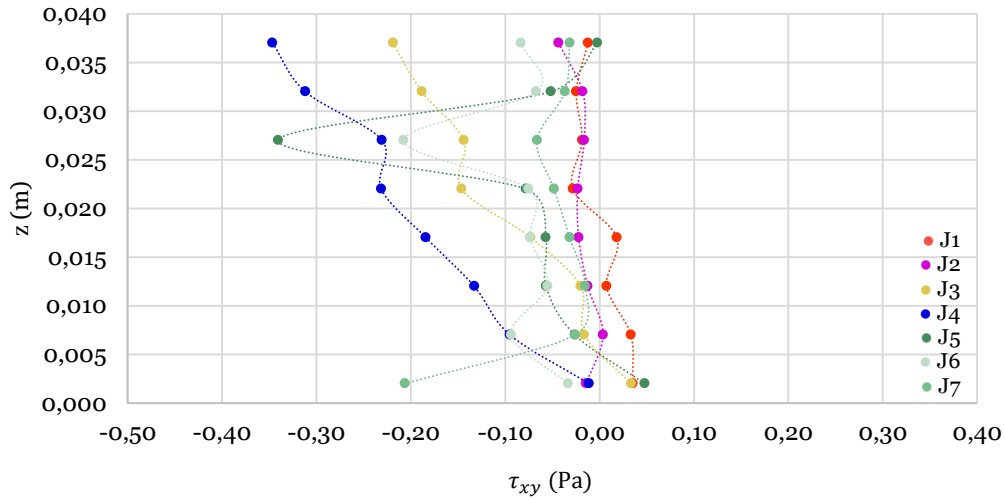


Figura 5.14: Distribuição das tensões de corte horizontais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante



c)

Figura 5.14 (cont.): Distribuição das tensões de corte horizontais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

Tabela 5.4: Valores de τ_{xy} (Pa) para os pontos em estudo

z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0,002	-0,022	0,009	-0,054	-0,048	-0,100	-0,038	-0,376
0,007	0,006	0,003	-0,038	-0,131	-0,054	-0,028	0,057
0,012	-0,010	-0,027	-0,085	-0,165	0,009	-0,013	-0,015
0,017	0,000	-0,034	-0,095	-0,217	-0,009	-0,005	-0,017
0,022	-0,007	-0,031	-0,123	-0,258	-0,059	-0,012	-0,031
0,027	0,000	-0,032	-0,119	-0,338	-0,051	-0,026	-0,027
0,032	-0,009	-0,025	-0,173	-0,318	-0,055	-0,027	-0,025
0,037	-0,009	-0,020	-0,142	-0,335	-0,032	-0,039	-0,020
z (m)	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,002	0,001	0,016	0,018	-0,009	-0,084	0,293	-0,011
0,007	0,032	-0,009	-0,046	-0,116	-0,056	-0,107	-0,008
0,012	-0,010	-0,017	-0,109	-0,191	-0,099	-0,089	-0,033
0,017	-0,007	-0,042	-0,139	-0,241	-0,076	-0,074	-0,045
0,022	-0,018	-0,021	-0,173	-0,243	-0,079	-0,049	-0,044
0,027	-0,020	-0,045	-0,184	-0,318	-0,099	-0,098	-0,065
0,032	-0,018	-0,033	-0,204	-0,354	-0,085	-0,045	-0,030
0,037	-0,007	-0,052	-0,199	-0,348	-0,093	-0,071	-0,042
z (m)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
0,002	0,035	-0,014	0,033	-0,011	0,048	-0,033	-0,206
0,007	0,033	0,004	-0,016	-0,095	-0,026	-0,094	-0,026
0,012	0,007	-0,013	-0,020	-0,133	-0,057	-0,055	-0,015
0,017	0,018	-0,022	-0,073	-0,184	-0,057	-0,074	-0,032
0,022	-0,028	-0,023	-0,146	-0,231	-0,078	-0,075	-0,048
0,027	-0,018	-0,016	-0,144	-0,231	-0,340	-0,208	-0,066
0,032	-0,025	-0,018	-0,188	-0,312	-0,052	-0,067	-0,037
0,037	-0,012	-0,044	-0,219	-0,347	-0,002	-0,083	-0,032

Através da visualização da Figura 5.14 pode afirma-se que independentemente da secção transversal analisada, as tensões de Reynolds horizontais são aproximadamente nulas em todo o canal, à exceção da zona da interface (M3, M4, I3, I4 J3 e J4) onde diminuem significativamente e têm máximos negativos.

As tensões de Reynolds no plano xy aferem a transferência de quantidade de movimento no plano horizontal, e essa transferência desenvolve-se principalmente na interface, como já foi referido, onde as tensões crescem em valor absoluto, devido ao diferencial de velocidades entre a zona vegetada e o canal principal.

Também é possível constatar, que à medida que a cota aumenta o valor da tensão na zona da interface aumenta. Verifica-se que para $z=0,037$ m a tensão máxima negativa ocorre no ponto I4, e assume o valor de $\tau_{xy}=-0,348$ Pa, como se pode verificar na Tabela 5.4.

5.5.2 Distribuição das tensões de corte verticais

Na Figura 5.15 representam-se os valores de τ_{xz} em função de z correspondentes às três secções transversais (secção de montante, secção intermédia e secção de jusante). Apresenta-se na Tabela 5.5 os valores de τ_{xz} para cada ponto de medição.

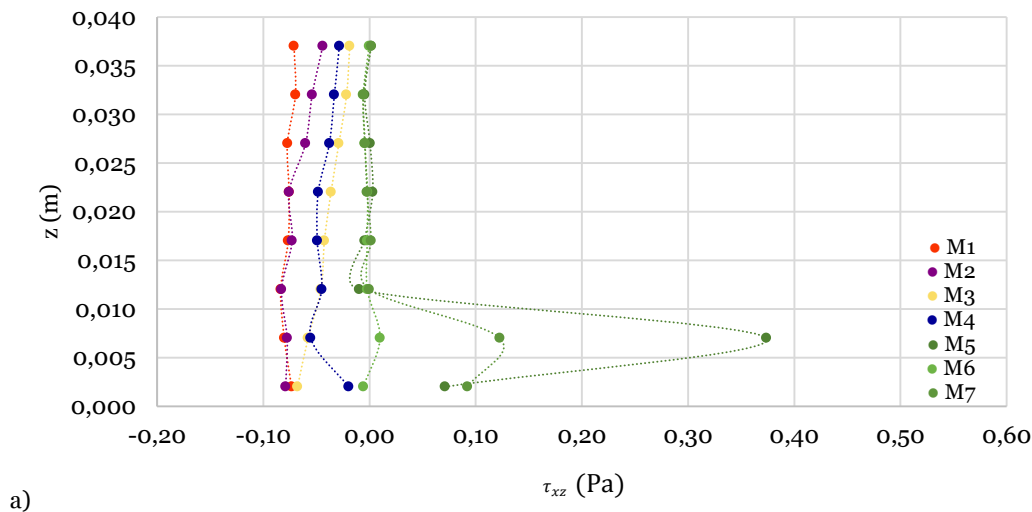


Figura 5.15: Distribuição das tensões de corte verticais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

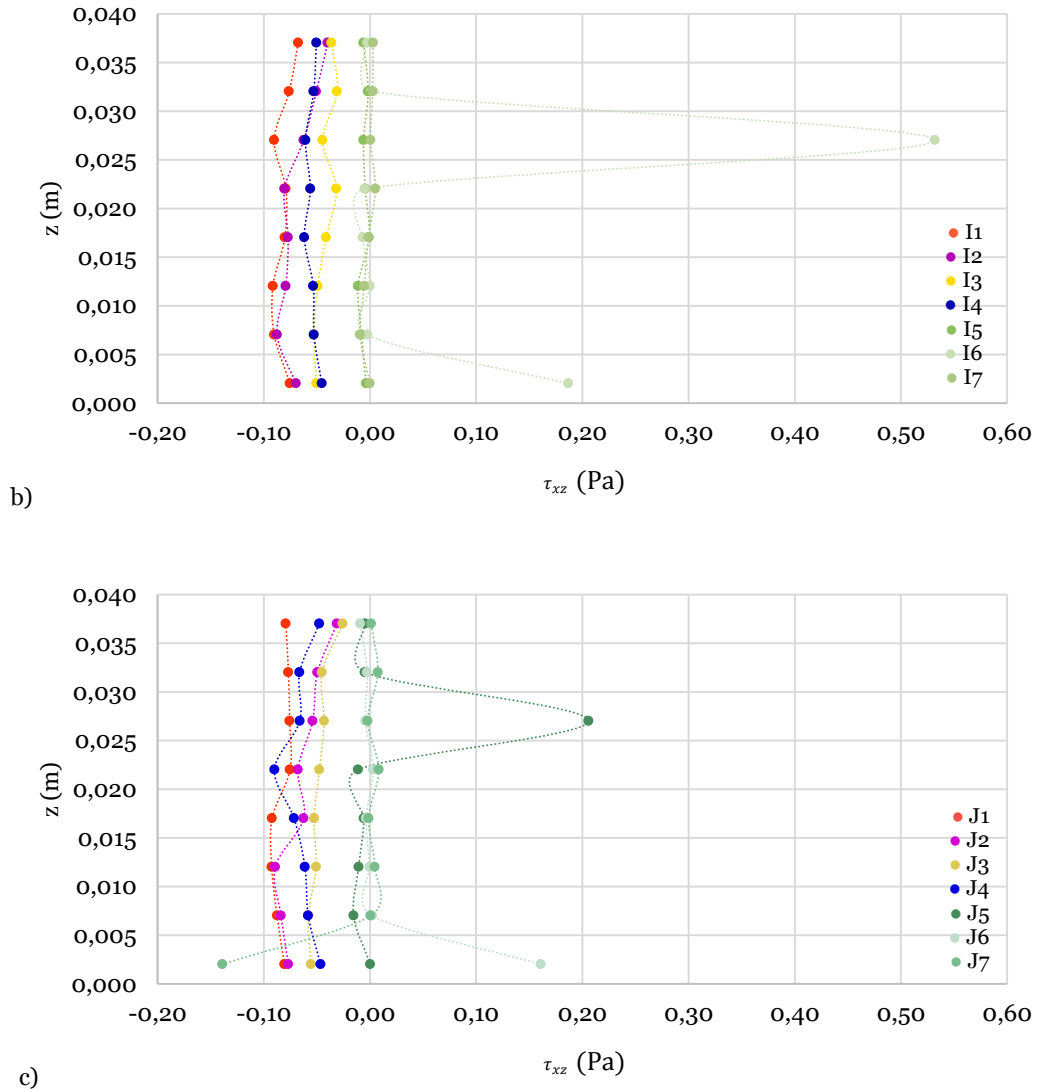


Figura 5.15 (cont.): Distribuição das tensões de corte verticais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

Tabela 5.5: Valores de τ_{xz} (Pa) para os pontos em estudo

z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0,002	-0,073	-0,079	-0,068	-0,020	0,071	-0,006	0,092
0,007	-0,080	-0,078	-0,058	-0,055	0,374	0,010	0,123
0,012	-0,084	-0,083	-0,046	-0,045	-0,010	-0,002	0,000
0,017	-0,077	-0,073	-0,043	-0,049	-0,005	-0,002	0,001
0,022	-0,076	-0,076	-0,036	-0,048	0,003	-0,002	-0,002
0,027	-0,077	-0,060	-0,029	-0,038	0,000	-0,005	-0,004
0,032	-0,070	-0,054	-0,022	-0,033	-0,005	-0,006	-0,006
0,037	-0,071	-0,044	-0,019	-0,028	0,001	0,000	0,002

Tabela 5.5 (cont.): Valores de τ_{xz} (Pa) para os pontos em estudo

z (m)	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,002	-0,075	-0,070	-0,050	-0,045	-0,004	0,187	0,000
0,007	-0,090	-0,087	-0,053	-0,053	-0,008	-0,003	-0,009
0,012	-0,091	-0,079	-0,049	-0,053	-0,011	0,000	-0,006
0,017	-0,080	-0,077	-0,041	-0,062	-0,001	-0,007	-0,001
0,022	-0,079	-0,080	-0,032	-0,056	-0,004	-0,005	0,005
0,027	-0,090	-0,062	-0,045	-0,061	-0,006	0,532	0,000
0,032	-0,076	-0,051	-0,031	-0,053	-0,002	0,003	0,003
0,037	-0,068	-0,040	-0,036	-0,051	-0,006	-0,002	0,003

z (m)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
0,002	-0,081	-0,077	-0,056	-0,047	0,000	0,161	-0,139
0,007	-0,088	-0,084	-0,058	-0,058	-0,016	0,002	0,001
0,012	-0,093	-0,089	-0,051	-0,061	-0,011	0,000	0,005
0,017	-0,092	-0,062	-0,053	-0,072	-0,006	-0,004	-0,001
0,022	-0,075	-0,068	-0,048	-0,090	-0,011	0,003	0,008
0,027	-0,076	-0,054	-0,043	-0,066	0,206	-0,004	-0,002
0,032	-0,077	-0,049	-0,045	-0,066	-0,005	-0,003	0,007
0,037	-0,079	-0,031	-0,026	-0,048	-0,005	-0,009	0,001

A análise da Figura 5.15 permite concluir que as tensões de corte verticais, τ_{xz} , no canal principal apresentam valores inferiores à zona vegetada, tomando o valor médio de $\tau_{xz} = -0,061$ Pa e $\tau_{xz} = 0,020$ Pa, respetivamente. Os valores próximos de zero no corredor ripícola traduzem o efeito retardador do escoamento por parte das hastes.

É importante referir que o facto de as tensões negativas estarem localizadas na interface, indica que existem correntes ascendentes que estão a transmitir as velocidades mais baixas junto ao fundo, gerando, assim, tensões tangenciais.

5.5.3 Distribuição das tensões de corte laterais

Na Figura 5.16 representam-se os valores de τ_{yz} em função de z correspondentes às três secções transversais em estudo. Apresenta-se na Tabela 5.6 os valores de τ_{yz} para cada ponto de medição.

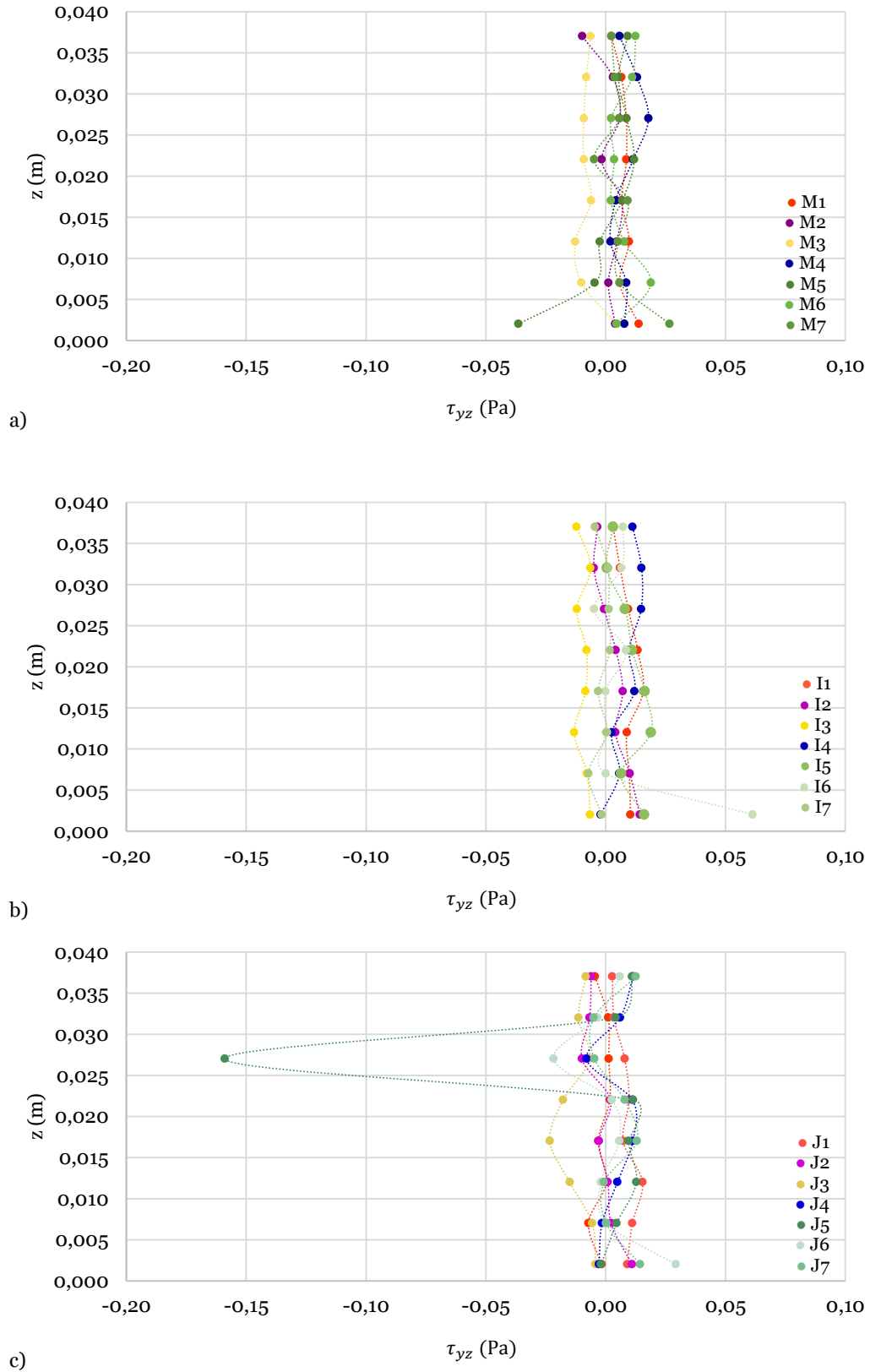


Figura 5.16: Distribuição das tensões de corte laterais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

Tabela 5.6: Valores de τ_{yz} (Pa) para os pontos em estudo

z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0,002	0,014	0,004	0,005	0,008	-0,036	0,005	0,027
0,007	0,006	0,001	-0,010	0,009	-0,005	0,019	0,006
0,012	0,010	0,005	-0,013	0,002	-0,002	0,008	0,005
0,017	0,007	0,007	-0,006	0,004	0,007	0,002	0,009
0,022	0,009	-0,002	-0,009	0,011	0,012	0,004	-0,005
0,027	0,009	0,006	-0,009	0,018	0,009	0,002	0,006
0,032	0,007	0,003	-0,008	0,013	0,005	0,011	0,004
0,037	0,002	-0,010	-0,006	0,006	0,009	0,013	0,002
z (m)	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,002	0,010	0,014	-0,006	-0,002	0,016	0,061	-0,002
0,007	0,010	0,010	-0,008	0,006	0,006	0,000	-0,007
0,012	0,009	0,004	-0,013	0,003	0,019	0,001	0,000
0,017	0,016	0,007	-0,008	0,012	0,016	0,000	-0,003
0,022	0,013	0,004	-0,008	0,010	0,011	0,008	0,002
0,027	0,009	-0,001	-0,012	0,015	0,008	-0,005	0,001
0,032	0,006	-0,005	-0,006	0,015	0,000	0,007	0,001
0,037	0,003	-0,003	-0,012	0,011	0,003	0,007	-0,004
z (m)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
0,002	0,009	0,011	-0,004	-0,003	-0,002	0,029	0,014
0,007	0,011	0,002	-0,006	-0,002	0,005	0,000	0,000
0,012	0,015	0,001	-0,015	0,005	0,013	-0,002	-0,001
0,017	0,007	-0,003	-0,023	0,011	0,010	0,006	0,013
0,022	0,010	0,002	-0,018	0,011	0,011	0,003	0,008
0,027	0,008	-0,010	-0,007	-0,008	-0,159	-0,022	-0,005
0,032	0,003	-0,007	-0,011	0,006	0,004	-0,003	-0,005
0,037	0,003	-0,006	-0,008	0,011	0,011	0,006	0,013

A análise da Figura 5.16 permite concluir que as três secções de estudo apresentam valores de tensões praticamente nulos, independentemente da altura relativa e se é no canal principal ou no corredor vegetado.

5.5.4 Distribuição das tensões normais horizontais

Na Figura 5.17 representam-se os valores de τ_{xx} em função de z correspondentes às três secções transversais em estudo. Apresenta-se na Tabela 5.7 os valores de τ_{xx} para cada ponto de medição.

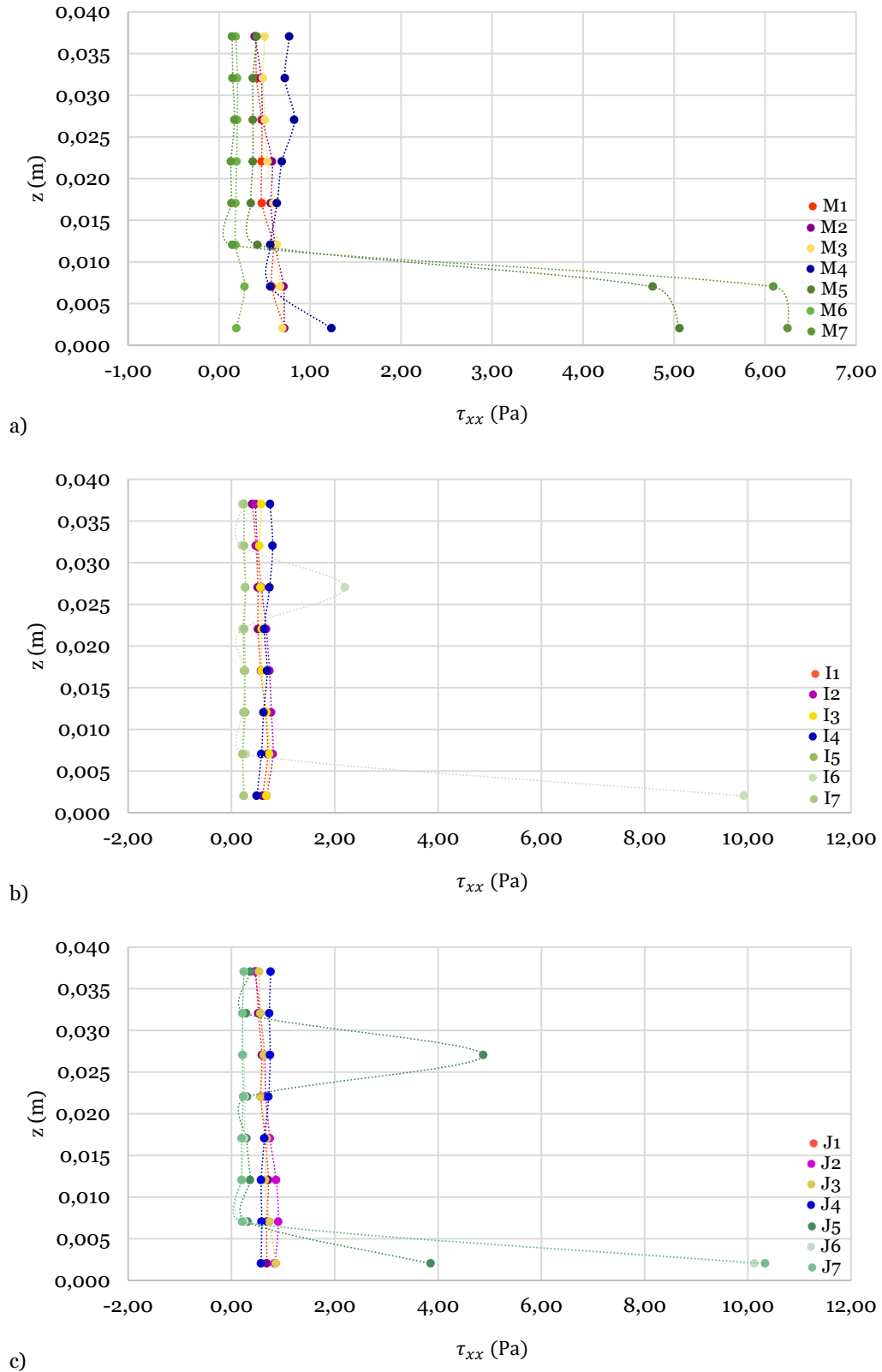


Figura 5.17: Distribuição das tensões normais horizontais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

Tabela 5.7: Valores de τ_{xx} (Pa) para os pontos em estudo

z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0,002	0,718	0,715	0,697	1,237	5,059	0,189	6,247
0,007	0,579	0,707	0,673	0,564	4,764	0,280	6,091
0,012	0,590	0,615	0,636	0,562	0,421	0,182	0,146
0,017	0,471	0,571	0,597	0,637	0,350	0,183	0,137
0,022	0,467	0,581	0,533	0,689	0,370	0,193	0,130
0,027	0,467	0,482	0,504	0,826	0,372	0,199	0,168
0,032	0,410	0,463	0,482	0,724	0,372	0,201	0,149
0,037	0,402	0,393	0,499	0,772	0,412	0,185	0,142

z (m)	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,002	0,600	0,683	0,682	0,492	0,243	9,925	0,241
0,007	0,702	0,803	0,736	0,580	0,217	0,282	0,217
0,012	0,659	0,773	0,680	0,621	0,265	0,236	0,241
0,017	0,573	0,737	0,585	0,692	0,246	0,256	0,266
0,022	0,515	0,673	0,589	0,639	0,230	0,212	0,252
0,027	0,513	0,579	0,564	0,739	0,268	2,200	0,272
0,032	0,476	0,502	0,544	0,798	0,237	0,203	0,250
0,037	0,405	0,464	0,580	0,750	0,247	0,211	0,241

z (m)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
0,002	0,685	0,841	0,866	0,573	3,858	10,129	10,336
0,007	0,684	0,911	0,741	0,586	0,314	0,254	0,210
0,012	0,715	0,866	0,653	0,577	0,362	0,207	0,200
0,017	0,652	0,746	0,689	0,640	0,294	0,248	0,199
0,022	0,571	0,667	0,565	0,720	0,304	0,263	0,227
0,027	0,588	0,643	0,629	0,751	4,879	0,235	0,212
0,032	0,521	0,555	0,564	0,735	0,288	0,213	0,214
0,037	0,473	0,455	0,536	0,761	0,368	0,244	0,239

É notório na Figura 5.17 a existência de pontos fora do “comum” relativamente aos perfis obtidos. Esses pontos existem nas três secções de estudo e são os pontos M5 e M7 para $z=0,002$ m e $z=0,007$ m (Figura 5.17 a)); o ponto I6 para $z=0,002$ m e $z=0,027$ m (Figura 5.17 b)); e os pontos J5 para $z=0,002$ m e $z=0,027$ m, e J6 e J7 para $z=0,002$ m (Figura 5.17 c)). A existência dos picos de medição nos pontos com as cotas inferiores deve-se ao efeito da presença do fundo do canal.

Também é possível concluir que as tensões normais horizontais são menores no corredor ripícola do que no canal principal.

5.5.5 Distribuição das tensões normais laterais

Na Figura 5.18 representam-se os valores de τ_{yy} em função de z correspondentes às três secções transversais em estudo. Apresenta-se na Tabela 5.8 os valores de τ_{yy} para cada ponto de medição.

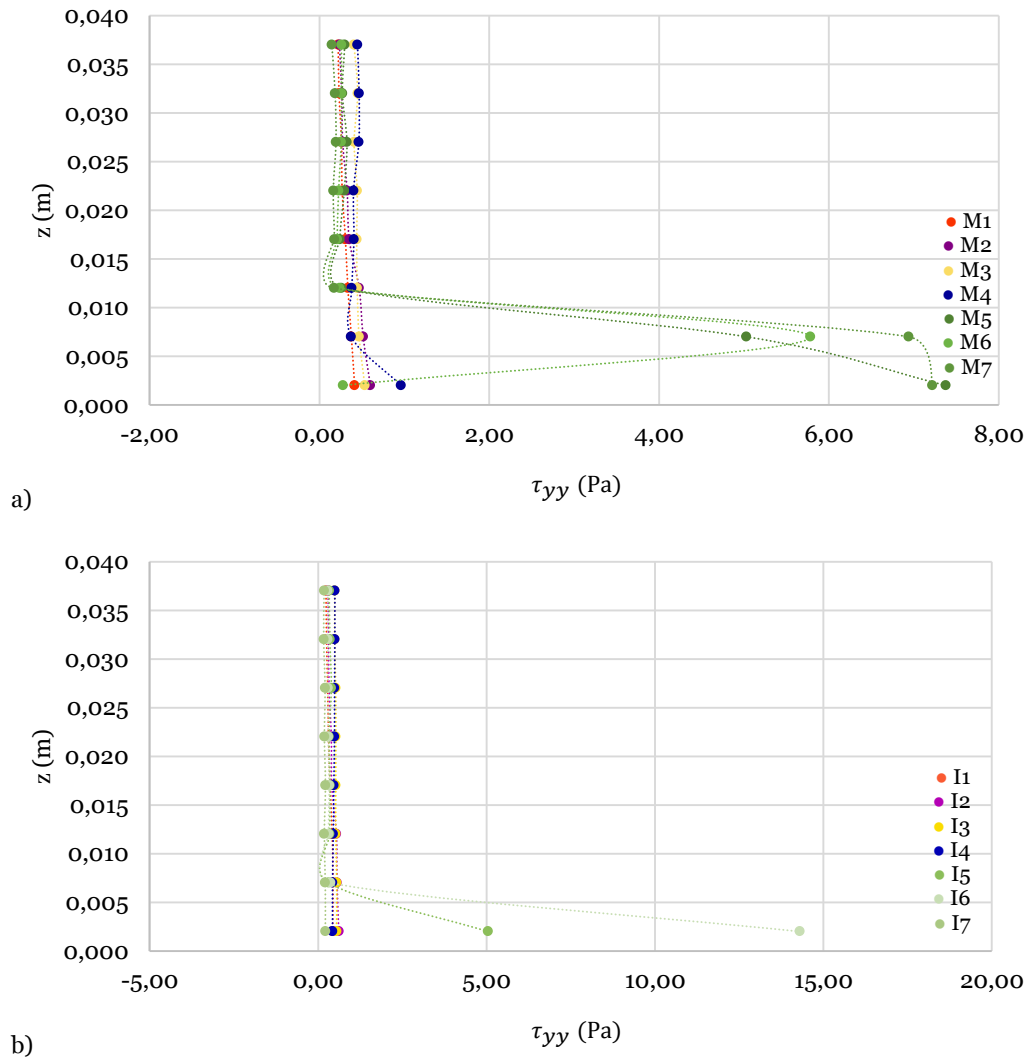
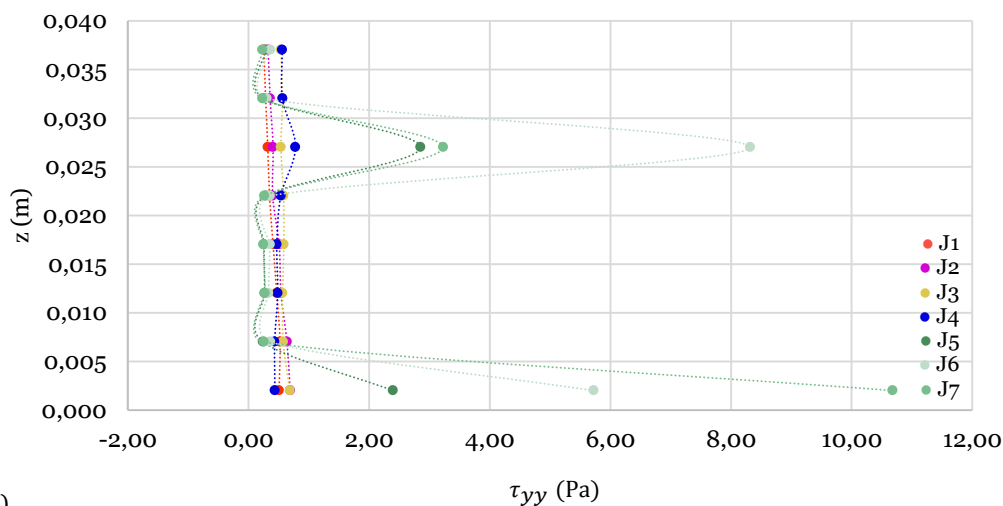


Figura 5.18: Distribuição das tensões normais laterais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante



c)

Figura 5.18 (cont.): Distribuição das tensões normais laterais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

 Tabela 5.8: Valores de τ_{yy} (Pa) para os pontos em estudo

z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0,002	0,414	0,599	0,533	0,959	7,377	0,276	7,219
0,007	0,376	0,514	0,466	0,374	5,027	5,781	6,937
0,012	0,334	0,467	0,445	0,381	0,260	0,237	0,170
0,017	0,306	0,350	0,438	0,405	0,240	0,210	0,176
0,022	0,267	0,326	0,444	0,402	0,291	0,225	0,163
0,027	0,259	0,273	0,408	0,463	0,323	0,257	0,194
0,032	0,230	0,262	0,449	0,467	0,270	0,258	0,184
0,037	0,220	0,235	0,406	0,448	0,298	0,259	0,145
z (m)	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,002	0,433	0,613	0,547	0,429	5,043	14,299	0,215
0,007	0,443	0,563	0,552	0,427	0,312	0,366	0,213
0,012	0,419	0,543	0,525	0,451	0,342	0,314	0,185
0,017	0,356	0,407	0,523	0,468	0,354	0,330	0,218
0,022	0,309	0,392	0,524	0,486	0,325	0,300	0,187
0,027	0,285	0,326	0,522	0,489	0,392	0,297	0,207
0,032	0,252	0,308	0,491	0,497	0,351	0,284	0,166
0,037	0,233	0,295	0,497	0,497	0,328	0,288	0,177
z (m)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
0,002	0,506	0,690	0,685	0,437	2,397	5,720	10,683
0,007	0,522	0,637	0,575	0,434	0,241	0,362	0,258
0,012	0,468	0,538	0,566	0,484	0,265	0,333	0,274
0,017	0,407	0,508	0,585	0,470	0,258	0,355	0,248
0,022	0,348	0,401	0,581	0,535	0,281	0,359	0,263
0,027	0,319	0,407	0,539	0,779	2,851	8,316	3,227
0,032	0,284	0,358	0,563	0,562	0,250	0,303	0,229
0,037	0,253	0,325	0,537	0,559	0,283	0,360	0,231

Observando a Figura 5.18 conclui-se que existem perfis de tensão normal lateral em que se encontram resultados nas medições que não se inserem no padrão das demais medições, exibindo picos de tensão. Esses picos são encontrados no ponto M5 para $z=0,002$ m e $z=0,007$ m, no ponto M6 para $z=0,007$ m, e no ponto M7 para $z=0,002$ m e $z=0,007$ m, na secção a montante (Figura 5.18 a)). Na secção intermédia para a cota $z=0,002$ m o ponto I5 e I6 também apresentam uma elevada variação (Figura 5.18 b)), por último, na secção de jusante os pontos J5, J6 e J7 apresentam picos para as cotas de $z=0,002$ m e $z=0,027$ m (Figura 5.18 c)). Este comportamento é comum à zona com hastes, e como já foi dito anteriormente é devido às hastes serem metálicas.

Não considerando os picos de tensão mencionados, conclui-se que os valores das tensões normais verticais são superiores no canal principal, tomando o valor médio de $\tau_{yy}=0,447$ Pa, e no corredor com hastes, o valor médio de $\tau_{yy}=0,268$ Pa.

5.5.6 Distribuição das tensões normais verticais

Na Figura 5.19 representam-se os valores de τ_{zz} em função de z correspondentes às três secções transversais em estudo. Apresenta-se na Tabela 5.9 os valores de τ_{zz} para cada ponto de medição.

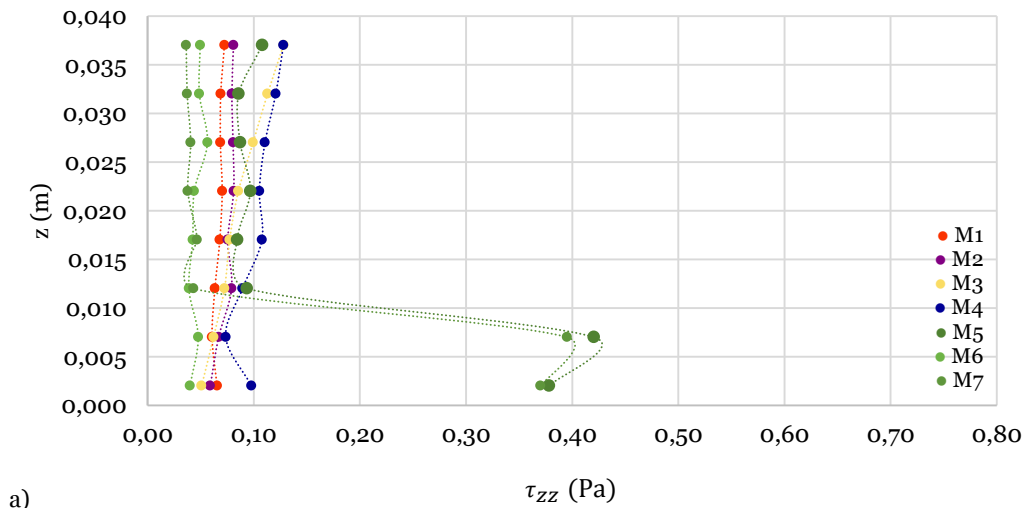


Figura 5.19: Distribuição das tensões normais verticais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

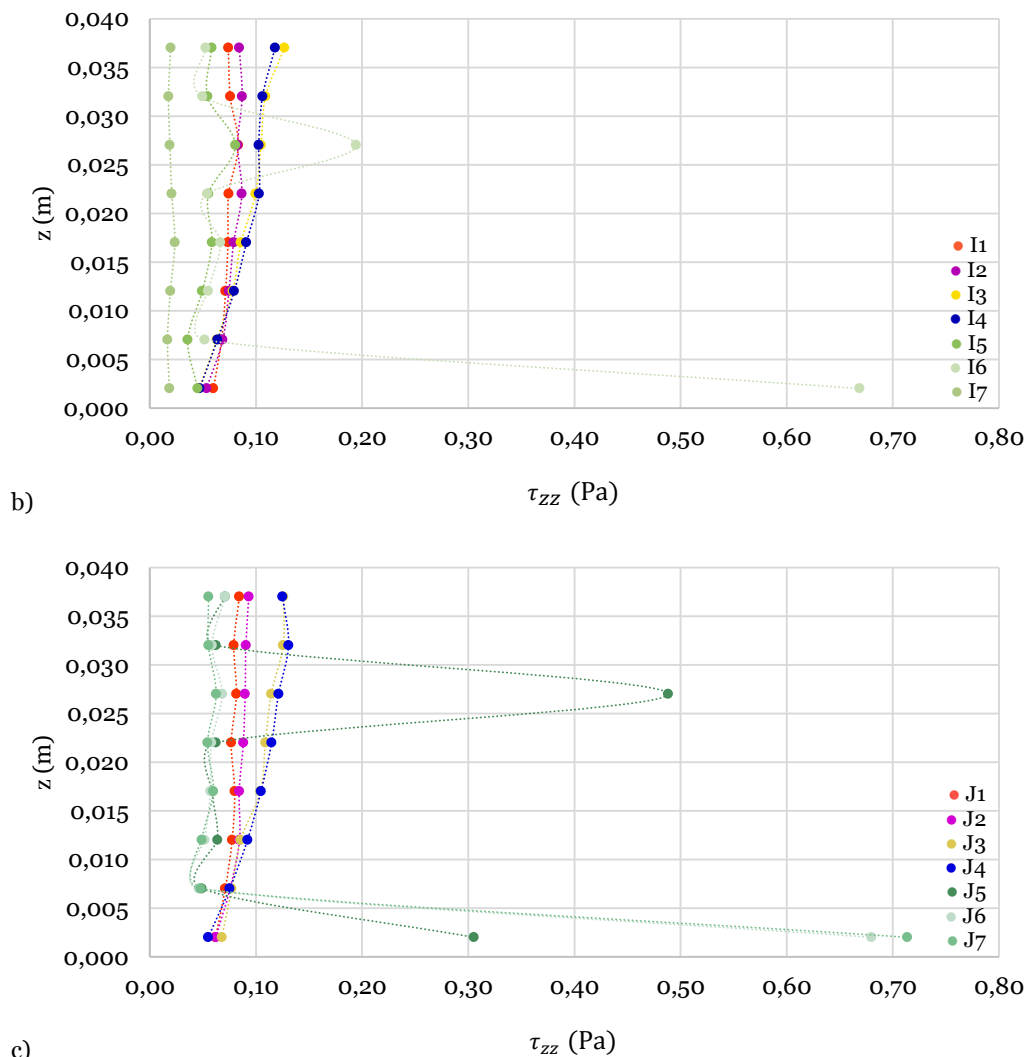


Figura 5.19 (cont.): Distribuição das tensões normais verticais - a) secção a montante, b) secção intermédia e c) secção a jusante

Tabela 5.9: Valores de τ_{zz} (Pa) para os pontos em estudo

z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0,002	0,065	0,059	0,051	0,098	0,378	0,040	0,370
0,007	0,061	0,067	0,062	0,074	0,420	0,048	0,395
0,012	0,063	0,079	0,072	0,089	0,093	0,039	0,043
0,017	0,068	0,076	0,077	0,108	0,084	0,042	0,047
0,022	0,070	0,081	0,085	0,105	0,097	0,044	0,038
0,027	0,069	0,080	0,099	0,111	0,087	0,056	0,041
0,032	0,069	0,079	0,113	0,121	0,086	0,049	0,037
0,037	0,072	0,081	0,128	0,128	0,108	0,049	0,036

Tabela 5.9 (cont.): Valores de τ_{zz} (Pa) para os pontos em estudo

z (m)	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,002	0,060	0,053	0,046	0,047	0,045	0,669	0,018
0,007	0,068	0,069	0,063	0,064	0,036	0,052	0,017
0,012	0,071	0,074	0,078	0,079	0,049	0,055	0,019
0,017	0,074	0,079	0,086	0,091	0,058	0,066	0,023
0,022	0,074	0,087	0,100	0,103	0,055	0,054	0,021
0,027	0,083	0,083	0,105	0,103	0,081	0,194	0,019
0,032	0,076	0,087	0,109	0,106	0,054	0,049	0,017
0,037	0,074	0,084	0,127	0,118	0,058	0,052	0,020
z (m)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
0,002	0,062	0,062	0,068	0,055	0,305	0,680	0,714
0,007	0,071	0,075	0,077	0,075	0,049	0,046	0,048
0,012	0,077	0,084	0,085	0,092	0,064	0,052	0,049
0,017	0,080	0,084	0,104	0,105	0,059	0,057	0,060
0,022	0,077	0,088	0,109	0,115	0,062	0,058	0,054
0,027	0,082	0,090	0,114	0,121	0,488	0,068	0,062
0,032	0,079	0,090	0,126	0,131	0,062	0,058	0,055
0,037	0,084	0,093	0,126	0,125	0,071	0,071	0,055

Através da Figura 5.19 é possível verificar que os perfis de tensão normal vertical também têm picos de medição. Estes picos correspondem aos pontos M5 e M7 para $z=0,002$ m e $z=0,007$ m na secção a montante (Figura 5.19 a)), ao ponto I6 para $z=0,002$ m e $z=0,027$ m na secção intermédia (Figura 5.19 b)), e ao ponto J5 para $z=0,002$ m e $z=0,027$ m e J6 e J7 para $z=0,027$ m na secção a jusante (Figura 5.19 c)). Mais uma vez este comportamento só é detetado no corredor ripícola.

Os valores das tensões normais laterais são menores no corredor com hastes ($\tau_{zz}=0,054$ Pa) do que no canal principal ($\tau_{zz}=0,085$ Pa), quando não considerados os picos de tensão nos pontos referidos.

5.6 Distribuição espacial da anisotropia

A aplicação do triângulo de Lumley quantifica o grau e a natureza da anisotropia da turbulência num determinado fluxo. Na Figura 5.20 é estudada a evolução dos invariantes -II e III para todos os pontos de medição, os pontos foram agrupados para cada ponto no plano horizontal colocando todas os pontos na vertical de modo a facilitar a sua análise.

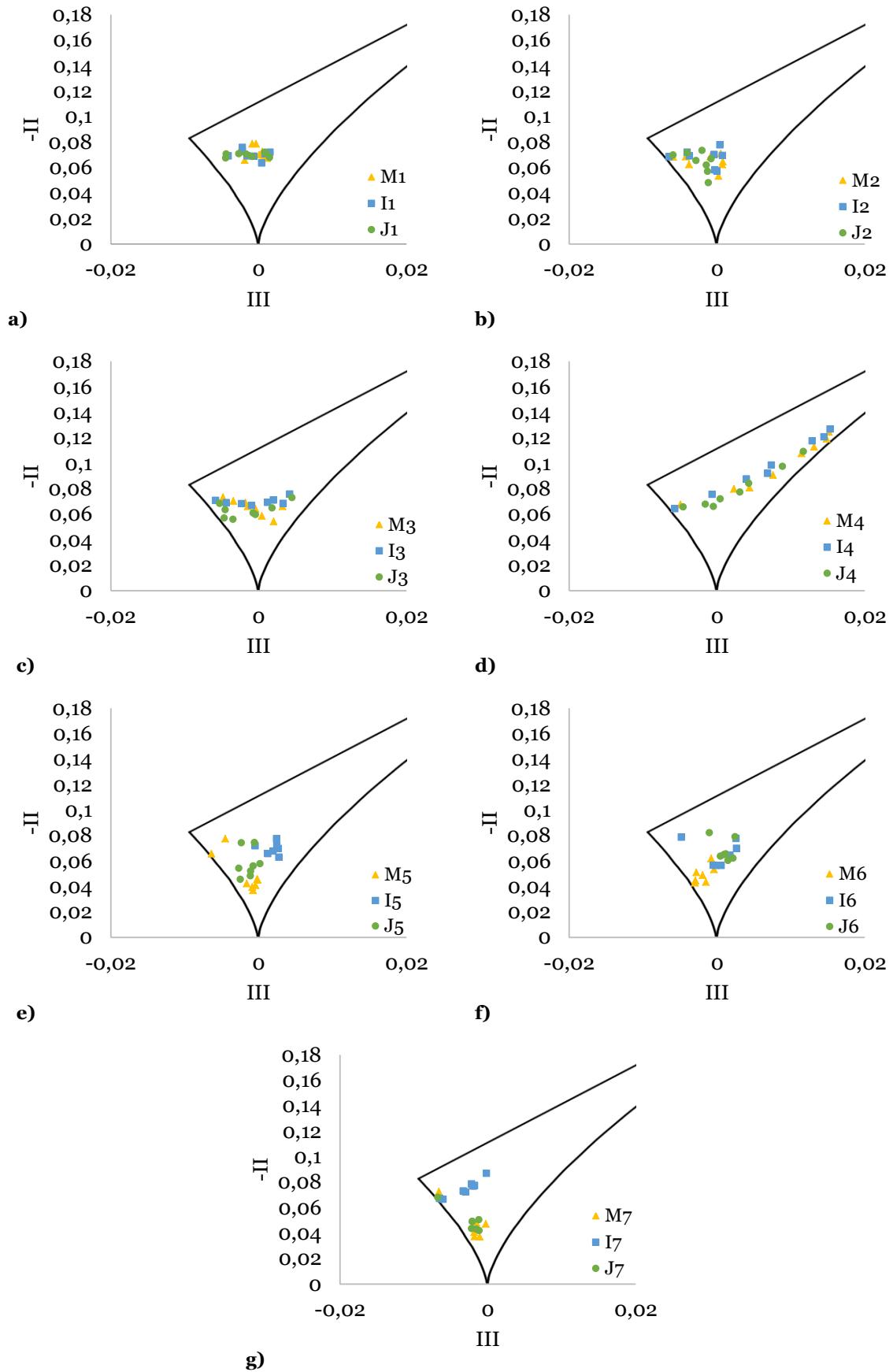


Figura 5.20: Distribuição dos invariantes da anisotropia no triângulo de Lumley, ao longo da profundidade do escoamento

Na Figura 5.20 identifica-se que todos os invariantes de anisotropia estão dentro do triângulo de Lumley. Independentemente de todos os invariantes de encontrarem dentro do triângulo, existem algumas diferenças nas estruturas turbulentas.

No canal principal (Figura 5.20 a), b), c) e d)), verifica-se que não existe uma variação significativa do estado de turbulência na direção longitudinal, pois as secções apresentam comportamentos semelhantes. O escoamento no canal principal vai-se desviando do comportamento de turbulência isotrópica 2D, desde o centro do canal em direção à zona da interface. Através da visualização da Figura 5.20, nota-se uma evolução desse comportamento, pois os pontos da Figura 5.20 b) e c) estão cada vez mais dispersos em direção a uma turbulência mais 3D, relativamente à Figura 5.20 a).

Na zona da camada de mistura (Figura 5.20 d)), o escoamento apresenta um comportamento em altura diferente dos outros pontos, em que tende a desviar-se de um estado quase turbulência isotrópica 2D, para um estado de turbulência em forma de cigarro, em que duas das componentes são parecidas e a outra é muito maior. À medida que nos deslocamos do fundo do canal para a superfície livre, o escoamento apresenta uma turbulência com estrutura próxima da forma de cigarro.

No corredor ripícola são visíveis algumas diferenças relativamente às três secções (Figura 5.20 e), f) e g)), que se pode dever ao efeito local da turbulência gerada pela presença das hastes.

Em nenhum dos casos estamos perto de um estado de isotropia, a estrutura da turbulência é claramente 3D.

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões para futuras investigações

6.1 Conclusões

O trabalho realizado na presente dissertação é de índole experimental, foi realizado no canal de estruturas hidráulicas do Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas, da Universidade da Beira Interior.

O estudo procurou caracterizar o escoamento na interface entre o canal principal e a zona vegetada emersa rígida, através da medição de valores instantâneos da velocidade no espaço entre hastes, na sua esteira e no canal principal, utilizando uma técnica intrusiva, o Velocímetro Doppler Acústico (ADV). Para além das velocidades instantâneas em três secções transversais foi ainda registada a profundidade do escoamento ao longo do canal. As velocidades instantâneas obtidas através do ADV foram filtradas por recurso ao *software WinADV* e posteriormente transformadas em velocidade média temporal e restantes grandezas turbulentas médias, como as tensões de Reynolds e a anisotropia.

Os resultados obtidos permitiram extrair as seguintes conclusões:

- As componentes vertical e transversal da velocidade têm magnitudes significativamente menores do que a componente longitudinal, na ordem de grandeza de um, e a componente vertical é inferior à componente transversal, o que seria expetável;
- A distribuição de velocidades longitudinais apresenta um perfil de velocidades típico de uma camada limite na zona do canal principal (perfil de velocidades quase logarítmico a aumentar para a superfície livre), e um perfil típico no corredor ripícola (perfil de velocidades quase constante, que mostra que o campo de velocidades nesta zona é essencialmente controlado pelas hastes);
- A análise da magnitude da velocidade longitudinal permite verificar que as velocidades são crescentes apresentando um valor mínimo junto à parede e máximo no eixo do canal, ou seja, as velocidades longitudinais que ocorrem nos perfis M7, I7 e J7, são inferiores às que ocorrem nos perfis M6, I6 e J6 e por sua vez, estas inferiores às que ocorrem nos perfis M5, I5 e J5. Este aspeto resulta do efeito de corte da camada de mistura se sobrepor ao efeito local da presença das hastes e ao de uma esteira de uma haste isolada. Aspeto que não se verificaria caso o canal

estivesse totalmente vegetado, nesse caso a velocidade longitudinal que se verificaria no perfil M6 deveria ser superior aos valores associados do perfil M5 e M7, sendo que estes últimos deveriam ser semelhantes;

- O escoamento apresenta uma estrutura turbulenta tridimensional;
- A variação na estrutura turbulenta aumenta com a proximidade à zona da camada de mistura, e tende a apresentar uma estrutura turbulenta em forma de cigarro na interface.

6.2 Sugestões para futuras investigações

A área científica na qual se insere a presente dissertação possui inúmeras abordagens e distintos caminhos por onde se pode enveredar. Aumentar o conhecimento sobre o tema e os fenómenos nele envolvidos, será sempre benéfico para a comunidade científica, pelo que se sugere dar continuidade a este estudo, sendo aconselhável:

- Caracterizar o escoamento considerando diferentes densidades de hastes;
- Caracterizar o escoamento considerando diferentes heterogeneidades de hastes;
- Caracterizar mais pormenorizadamente o escoamento e quantificar as transferências de massa;
- Caracterizar o escoamento considerando a existência de sedimentos em suspensões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abernethy, B., & Rutherford, I. D. (1998). Where along a river's length will vegetation most effectively stabilise stream banks? *Geomorphology*, *23*, 55–75.
- Arixpe, D., Mendes, A., & Rabaça, J. (2009). *Zonas Ribeirinhas Sustentáveis - Um guia de gestão* (ISAPress, Ed.).
- Barbosa, B. S. B. (2014). *Influência da vegetação na estrutura do escoamento em canais de secção composta*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Brederode, V. (1997). *Fundamentos de aerodinâmica incompressível*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Cardoso, A. (1998). *Hidráulica Fluvial*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Fael, C. M. S. (2008). *Erosões localizadas junto de encontros de pontes e respectivas medidas de protecção*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade da Beira Interior. Covilhã.
- Finelli, C. M., Hart, D. D., & Fonseca, D. M. (1999). Evaluating the spatial resolution of an acoustic Doppler velocimeter and the consequences for measuring near-bed flows. *Limnology and Oceanography*, *44*(7), 1793–1801. <https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.7.1793>
- Goring, D. G., & Nikora, V. I. (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, *128*(1), 117–126. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2002\)128:1\(117\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:1(117))
- Green, J. C. (2006). Effect of macrophyte spatial variability on channel resistance. *Advances in Water Resources*, *29*(3), 426–438. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.05.010>
- Hamilton, N. M., & Cal, R. B. (2014). Characteristic shapes of the normalized Reynolds stress anisotropy tensor in the wakes of wind turbines with counter-rotating rotors. In *Proc. of 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*.

- Heron, K. (2007). *Vortex Shedding on Bridge Piers*. University of Southern Queensland.
- Järvelä, J. (2002). Flow resistance of flexible and stiff vegetation: A flume study with natural plants. *Journal of Hydrology*, 269(1-2), 44-54. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00193-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00193-2)
- Kadlec, R. H. (1990). Overland Flow in wetlands: Vegetation Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(5), 691-706.
- López, F., & García, M. (1998). *Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling*. 34(9), 2341-2352.
- Lory, J. P. S. (2011). *Estudo laboratorial de escoamentos em leitos com vegetação emersa e rígida*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Perfil de Construção. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- Lumley, J. L. (1979). *Computational Modeling of Turbulent Flows*. In *Advances in applied mechanics* (Vol. 18, pp. 123-176). Elsevier.
- Lumley, J., & Newman, G. (1977). The return to isotropy of homogeneous turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 82, 161-178.
- Massey, B. (2002). *Mecânica dos Fluidos*. Lisboa.
- McKenney, R., Jacobson, R. B., & Wertheimer, R. C. (1995). Woody vegetation and channel morphogenesis in low-gradient, gravel-bed streams in the Ozark Plateaus, Missouri and Arkansas. *Geomorphology*, 13(1-4), 175-198. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00034-3](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00034-3)
- Mera, I., Franca, M. J., Anta, J., & Peña, E. (2015). Turbulence anisotropy in a compound meandering channel with different submergence conditions. *Advances in Water Resources*, 81, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.10.012>
- Nepf, H. M. (1999). Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research*, 35(2), 479-489. <https://doi.org/10.1029/1998WR900069>
- Nepf, H. M. (2012). Hydrodynamics of vegetated channels. *Journal of Hydraulic Research*, 50(3), 262-279. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17719-9_21

- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., & Walters, R. (2007). Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 873–883. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:8\(873\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(873))
- Nortek. (2009). *Vectrino Velocimeter User guide*. Nortek AS, Vangkroken 2, NO-1351 RUD, Norway.
- Novais-Barbosa, J. (1985). *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral Vol:1* (P. E. LDA, Ed.).
- Ormerod, S. J., Rundle, S. D., Clare Lloyd, E., & Douglas, A. A. (1993). The influence of riparian management on the habitat structure and macroinvertebrate communities of upland streams draining plantation forests. *Journal of Applied Ecology*, 30, 13–24. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(93\)90043-z](https://doi.org/10.1016/0006-3207(93)90043-z)
- Pasche, E., & Rouvé, G. (1985). Overbank flow with vegetatively roughened flood plains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(9), 1262–1278.
- Pollen, N. (2007). Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*, 69(3), 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.05.004>
- Pope, S. (2000). *Turbulent Flows*. Cornell University. New York.
- Precht, E., Janssen, F., & Huettel, M. (2006). Near-bottom performance of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) - A comparative study. *Aquatic Ecology*, 40(4), 481–492. <https://doi.org/10.1007/s10452-004-8059-y>
- Quintela, A. C. (2005). *Hidráulica* (Fundação Calouste Gulbenkian, Ed.).
- Ricardo, A. M. da C. (2008). *Caracterização do escoamento turbulento em canais com vegetação emersa rígida. Aplicação ao estudo da resistência hidráulica*. <https://doi.org/10.5894/rh34n2-5>
- Rijo, M. (2010). *Canais de Adução*. Edições Sílabo, Lisboa.
- Schlichting, H. (1968). *Boundary - Layer Theory* (McGraw Hill). 6th ed.
- Simon, A., & Collison, A. J. C. (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and*

Landforms, 27(5), 527–546. <https://doi.org/10.1002/esp.325>

Tanino, Y., & Nepf, H. M. (2008). Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 34–41. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:1\(34\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(34))

Tennekes, H., & Lumley, J. (2010). *Turbulência em Fluidos*. Fundação Calouste Gulbenkian.

Vaz, A. L. S. (2013). *O Efeito da Vegetação na Resistência ao Escoamento em Canais Naturais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica. Universidade do Porto. Porto

Wahl, T. (2003). Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data” by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6), 484–487.

White, B. L., & Nepf, H. M. (2003). Scalar transport in random cylinder arrays at moderate Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 487, 43–79. <https://doi.org/10.1017/S0022112003004579>

White, B. L., & Nepf, H. M. (2007). Shear instability and coherent structures in shallow flow adjacent to a porous layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 593, 1–32. <https://doi.org/10.1017/S0022112007008415>

Yager, E. M., & Schmeeckle, M. W. (2013). The influence of vegetation on turbulence and bed load transport. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1585–1601. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20085>

Yen, B. C. (2002). Open channel flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 20–39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:1\(20\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(20))