



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Influência da permeabilidade de elementos cilíndricos verticais no comportamento do escoamento

Rafael Manuel Teles Robalo

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

Orientador: Prof. Doutor Cristina Maria Sena Fael
Co-orientador: Eng. Ricardo Manuel Martins de Azevedo

Covilhã, Outubro de 2014

Dedicatória

Aos meus pais, a quem devo o que sou hoje e o que serei amanhã.

Agradecimentos

A dissertação de mestrado que aqui se apresenta marca o fim do meu ciclo de estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Devido a todo o trabalho que esta dissertação envolveu, reservo esta página para manifestar o meu agradecimento a todos os intervenientes sem os quais não teria sido possível ser concluída.

À Professora Cristina Fael agradeço toda a disponibilidade e empenho que demonstrou na realização da dissertação. O seu conhecimento científico e motivação foram fundamentais no desenvolvimento de todas as etapas deste trabalho. Mais que tudo, valorizo o apoio e amizade que demonstrou em todo o meu percurso académico.

Agradeço ao Engenheiro Ricardo Azevedo todo o apoio dispensado nas fases desta dissertação, em especial na componente experimental, ao nível do LDV, e na programação com o software Matlab, nas quais foi fundamental.

Agradeço o apoio e amizade do Sr. Jorge Barros, técnico do Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas, que colocou todo o seu empenho e experiência na preparação e acompanhamento da campanha experimental.

A todos os professores desta instituição que manifestaram o seu apoio quer com conhecimento ou simples interesse.

Agradeço toda a amizade e cumplicidade de Débora Santos, cujo apoio nos bons e maus momentos foi determinante para realização da dissertação.

O meu agradecimento final é para a minha família e amigos, por todo o carinho e compreensão que demonstraram em todo este percurso.

Resumo

O conhecimento do campo de escoamento, junto de estruturas permeáveis, tem permitido implementar medidas, recorrendo a esse tipo de estruturas, na estabilização de leitos e na proteção das margens de rios. A adoção destas medidas, baseadas em enrocamentos, também têm sido utilizadas na proteção contra as erosões localizadas junto das fundações de pontes. Ainda assim, persistem dúvidas devido à complexidade dos fenómenos envolvidos, nomeadamente quando as estruturas permeáveis se desenvolvem em altura.

Na presente dissertação pretende-se realizar um estudo comparativo do campo de escoamentos que se desenvolve junto de dois elementos cilíndricos verticais, com porosidades de 0% e ≈50%, ensaiados no canal de Estruturas Hidráulicas da UBI.

No trabalho experimental, as medições das componentes bidimensionais das velocidades instantâneas, longitudinal e vertical, foram realizadas em três planos transversais, com um sistema 3D de Velocimetria Doppler Laser (LDV). Os contornos das componentes da velocidade média no tempo, dos vetores velocidade, das intensidades turbulentas, das tensões de Reynolds e das tensões tangenciais totais, são utilizados na caracterização do campo de escoamento em torno dos obstáculos.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a permeabilidade influencia as características do campo do escoamento junto ao elemento cilíndrico. A possibilidade do escoamento, que chega a montante do obstáculo, poder passar pela estrutura porosa, em vez de a contornar, caso esta fosse impermeável, possibilita a minimização do escoamento descendente, em quantidade e velocidade, condicionando o desenvolvimento do vórtice em ferradura. Já a jusante, por influência do escoamento que atravessa a estrutura porosa, a zona de esteira não apresenta vorticidades tão bem definidas, como no caso do escoamento que contorna o elemento cilíndrico impermeável. A partir desta secção, a zona inferior da esteira turbulenta, em vez de apresentar o escoamento ascendente característico de estruturas cilíndricas impermeáveis, que promove o transporte de sedimentos, apresenta um escoamento mais horizontal, com tendência descendente e capaz de promover a deposição de sedimentos para jusante dos obstáculos.

De um modo geral, a interferência que um elemento cilíndrico provoca no seio de um escoamento, é menor quando este é dotado de alguma permeabilidade, que mantenha o melhor possível a continuidade do escoamento longitudinal, diminuído a necessidade deste ter de a contornar, e assim reduzir o escoamento descendente que irá originar as erosões localizadas.

Palavras-chave: elemento cilíndrico, permeabilidade, campos de velocidade, escoamento turbulento, LDV

Abstract

The flow field knowledge, along permeable structures, has allowed the implementation of measures, resorting to this type of structures, in beds stabilization and river banks protections. The adoption of these measures, based on riprap, have also been used to protect against local scour close to bridges foundations. Nevertheless, there are still doubts due to the complexity of the phenomena involved, particularly, when the permeable structures develop in height.

The present dissertation provides a comparative study between the flow field around two circular piers, with porosities of 0% and $\approx 50\%$, tested in UBIs Hydraulic Structure channel.

In experimental work, the two-dimensional components of the instantaneous velocity, longitudinal and vertical, were measured on three cross sections, using a Laser Doppler Velocimeter (LDV). The contours of time-averaged velocity components, velocity vectors, turbulence intensities, Reynolds shear stresses and tangential shear stresses are presented to characterize the flow around obstacles.

The results showed that the permeability influences the characteristics of the flow field along the cylindrical element. The possibility of the flow that arrives upstream of the obstacle can pass through the porous structure, rather than around, should it be solid, allows minimizing of the downflow, in quantity and velocity, conditioning the development of the horseshoe vortex. In downstream, due to the influence of the bleed-flow, the wake region has no vorticities as well defined, as in the case of deflected flow in a solid pier. From this section, the lower of the wake region, instead of displaying the typical upflow of impermeable cylindrical structures, which promotes the transport of sediments, presents a more horizontal flow, with downflow capable of promoting the deposition of sediment to the downstream of obstacles.

In a general way, the interference that a cylindrical element causes within a flow is smaller when this is endowed with some permeability, which maintains the best possible longitudinal continuity of flow, reducing the deflected flow and downflow which leads to local scour.

Keywords: cylindrical element, permeability, velocity field, turbulent flow, LDV

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos, metodologia e estrutura da dissertação	2
2	Revisão bibliográfica.....	5
2.1	Introdução	5
2.2	Escoamento turbulento em canais de leito fixo.....	5
2.2.1	Estrutura do escoamento.....	5
2.2.2	Distribuição da velocidade	7
2.2.3	Intensidade turbulenta	8
2.2.4	Distribuição das tensões tangenciais.....	9
2.3	Estudos experimentais em pilares cilíndricos impermeáveis	10
2.4	Estudo em estruturas permeáveis	13
3	Instalação experimental e equipamentos de medição.....	15
3.1	Considerações gerais.....	15
3.2	Descrição do canal de Estruturas Hidráulicas	15
3.3	Equipamentos de medição	18
3.3.1	Considerações gerais.....	18
3.3.2	Caudal e altura de escoamento	19
3.3.3	Medição de campos de velocidades instantâneas - Conceitos do Sistema 3D de Velocimetria Doppler Laser (LDV)	20
4	Campanha experimental	25
4.1	Considerações gerais.....	25
4.2	Descrição dos elementos cilíndricos.....	25
4.3	Obtenção do regime uniforme	26
4.4	Calibração do Sistema 3D de Velocimetria Doppler Laser (LDV).....	28
4.5	Medições dos campos de velocidades instantâneas junto aos obstáculos	28
5	Processamento de dados.....	33
5.1	Considerações gerais.....	33

5.2	Tratamento de dados	33
5.3	Integração dos dados das velocidades	35
5.3.1	Velocidades médias	35
5.3.2	Intensidades turbulentas e tensões de Reynolds.....	36
6	Caracterização do escoamento junto de elementos cilíndricos	37
6.1	Considerações gerais.....	37
6.2	Elemento cilíndrico impermeável	37
6.2.1	Velocidades médias temporais.....	38
6.2.2	Intensidade turbulenta	43
6.2.3	Tensões de Reynolds no plano vertical	46
6.2.4	Tensões tangenciais.....	47
6.3	Elemento cilíndrico permeável	49
6.3.1	Velocidades médias temporais.....	49
6.3.2	Intensidades turbulentas	53
6.3.3	Tensões de Reynolds no plano vertical	56
6.3.4	Tensões tangenciais.....	56
6.4	Influência da permeabilidade do elemento cilíndrico	59
6.4.1	Considerações gerais.....	59
6.4.2	Perfis de velocidades	59
6.4.3	Intensidade turbulenta	63
6.4.4	Tensão de Reynolds	66
7	Conclusões e propostas de trabalhos futuros	69
	Bibliografia.....	73

Lista de figuras

Fig. 2.1- Camada limite provocada por uma placa fina, delgada e paralela à velocidade do escoamento (Quintela, 1981)	6
Fig. 2.2- Distribuição de velocidades numa vertical (adaptada de Quintela, 1981)	8
Fig. 2.3- Variação da tensão tangencial e das suas duas componentes com a profundidade de um escoamento (adaptada de Cardoso, 1998 <i>in</i> Teixeira, 2011)	10
Fig. 2.4- Esteira turbulenta a jusante de um cilindro (Quintela, 1981).....	11
Fig. 2.5- Estrutura do escoamento junto de pilares (Melville e Coleman, 2000 <i>in</i> Fael, 2008) 13	
Fig. 2.6- Esquema do escoamento <i>bleed-flow</i> em torno de uma estrutura porosa (Schnauder & Moggridge, 2009)	14
Fig. 3.1- Vista geral do canal	15
Fig. 3.2- Vista 3D do canal	16
Fig. 3.3- Pormenor da lâmina de acrílico.....	17
Fig. 3.4- Entrada do canal, vista de jusante	17
Fig. 3.5- Trecho de jusante do canal, comporta pendular, vista de montante	18
Fig. 3.6- Caudalímetro eletromagnético instalado na tubagem do circuito de alimentação... 19	
Fig. 3.7- Hidrómetro instalado no carrinho do canal	19
Fig. 3.8- Equipamentos PDM 100 e FSA 3500.....	20
Fig. 3.9- Laser Innova 70 C de Árgon	21
Fig. 3.10- FBL-2 Multicolor Beam Separator	21
Fig. 3.11- (a) Vista lateral das duas sondas do LDV e (b) perspectiva das mesmas sondas	22
Fig. 3.12- Sistema de posicionamento 3D que possibilita movimentar a sonda do LDV	22
Fig. 3.13- Layout do Software FlowSizer™ onde se realizou a recolha de dados.....	23
Fig. 3.14- (a) Esquema do volume de medição criado por um par de feixes e (b) sinal criado por uma partícula num sistema LDV (Urbano & Téllez, 2011).	23
Fig. 3.15- Feixes emitidos pela sonda 2D e criação do volume de medição.....	24
Fig. 4.1- Elementos cilíndricos a) impermeável e b) permeável	25
Fig. 4.2- Vistas do elemento cilíndrico permeável, a) 3D; b) Corte; c) Topo	26
Fig. 4.3- Calibração de um feixe do LDV com recurso a um medidor de potência	28
Fig. 4.4- (a) Ensaio 1 - Pilar impermeável e (b) Ensaio 2 - Pilar permeável.....	29

Fig. 4.5- Malha de medição adotada nas secções transversais de montante e jusante	29
Fig. 4.6- Esquema de medição em planta e respetivo pormenor	30
Fig. 4.7- Esquema tridimensional com a identificação das secções transversais dos ensaios realizados	30
Fig. 4.8- Feixe da componente w intersetado pelo fundo do canal	31
Fig. 4.9- Sistema de eixos adotado na dissertação	32
Fig. 5.1- Aplicação da primeira etapa do filtro proposto por Goring & Nikora (2002) e modificado por Azevedo (2012), na secção transversal de montante.....	34
Fig. 5.2- Aplicação da segunda etapa do filtro proposto por Goring & Nikora (2002) e modificado por Azevedo (2012), na secção transversal de montante.....	34
Fig. 5.3- Processo de identificação das componentes u e w registadas no mesmo instante ...	35
Fig. 6.1- Esquema representativo do ensaio do elemento cilíndrico impermeável	37
Fig. 6.2- Isolinhas da velocidade média do escoamento, componente longitudinal, U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	40
Fig. 6.3- Isolinhas da velocidade média do escoamento, componente vertical, W , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	41
Fig. 6.4- Vetores velocidade no plano xz , nas secções transversais ao escoamento, a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	43
Fig. 6.5- Intensidade turbulenta U_{rms} , normalizada por U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	44
Fig. 6.6- Intensidade turbulenta W_{rms} , normalizada por U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	45
Fig. 6.7- Tensões de Reynolds no plano xz , τ_{xz} , normalizadas por ρU^2 , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante.....	46
Fig. 6.8- Tensões tangenciais, normalizadas por U^2 , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	48
Fig. 6.9- Esquema representativo com a localização do elemento cilíndrico permeável	49
Fig. 6.10- Isolinhas da velocidade média do escoamento, componente longitudinal, U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	50
Fig. 6.11- Isolinhas da velocidade média do escoamento, componente vertical, W , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	51
Fig. 6.12- Vetores velocidade no plano xz , nas secções transversais ao escoamento, a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	53

Fig. 6.13- Intensidade turbulenta U_{rms} , normalizada por U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	54
Fig. 6.14- Intensidade turbulenta W_{rms} , normalizada por U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	55
Fig. 6.15- Tensões de Reynolds no plano xz, τ_{xz} , normalizadas por ρU^2 , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	57
Fig. 6.16- Tensões tangenciais, normalizadas por U^2 , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	58
Fig. 6.17- Escoamento junto de estruturas cilíndricas, a) impermeável; b) porosa	59
Fig. 6.18- Distribuição vertical da velocidade média do escoamento, componente longitudinal, U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	60
Fig. 6.19- Distribuição vertical da velocidade média do escoamento, componente vertical, W , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	62
Fig. 6.20- Perfil vertical da intensidade turbulenta U_{rms} , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	64
Fig. 6.21- Perfil vertical da intensidade turbulenta W_{rms} , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	65
Fig. 6.22- Perfil vertical da tensão de Reynolds, τ_{xz} , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante	66

Lista de Tabelas

Tabela 1- Condições experimentais	28
---	----

Lista de Acrónimos

DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
LDV	Sistema 3D de Velocimetria Doppler Laser (em terminologia inglesa - <i>Laser Doppler Velocimeter</i>)
LHFE	Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas
PDM	Modulo Foto Detetor (em terminologia inglesa - <i>Photo Detector Module</i>)
PDPA	Analisador de Partículas por Efeito Doppler (em terminologia inglesa - <i>Phase Doppler Particle Analyzer</i>)
UBI	Universidade da Beira Interior

Simbologia

A	Área da secção transversal de escoamento (m^2)
b	Largura do canal (m)
B	Constante aditiva da lei logarítmica
F_r	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
h	Altura de escoamento (m)
K	Constante universal de Von Kármán
L	Comprimento do canal (m)
N	Número de registos obtidos em cada ponto
Q	Caudal (m^3/s)
R	Raio hidráulico (m)
R_e	Número de Reynolds
S_0	Declive longitudinal do canal (%)
u	Velocidade instantânea na direção x (m/s)
u'	Flutuação turbulenta da velocidade na direção x (m/s)
U	Velocidade média temporal na direção x (m/s)
U_{rms}	Intensidade turbulenta na direção x (m/s)
U_{max}	Velocidade máxima na direção x (m/s)
U_*	Velocidade de atrito junto ao fundo (m/s)
$U_{*(y)}$	Velocidade de atrito na posição transversal Y (m/s)
U_{CS}	Velocidade média numa secção transversal (m/s)
w	Velocidade instantânea na direção z (m/s)
w'	Flutuação turbulenta de velocidade na direção z (m/s)
W	Velocidade média temporal na direção z (m/s)
W_{rms}	Intensidade turbulenta na direção z (m/s)
x	Direção do escoamento
X	Posição longitudinal no canal (m)

y	Direção transversal ao escoamento
Y	Posição transversal no canal (m)
z	Direção perpendicular ao fundo do canal
Z	Posição vertical no canal (m)
ε	Porosidade (%)
δ'	Espessura da subcamada viscosa (m)
ρ	Massa volúmica de um fluido (kg/m^3)
τ	Tensão tangencial (N/m^2)
τ_l	Tensão tangencial de origem viscosa (N/m^2)
τ_t	Tensão de Reynolds (N/m^2)
τ_{xz}	Tensão de Reynolds no plano xz (N/m^2)
τ_0	Tensão de arrastamento junto ao fundo (N/m^2)
ν	Viscosidade cinemática de um fluido (m^2/s)
μ	Viscosidade dinâmica de um fluido ($\text{Kg}/\text{s}/\text{m}$)

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Há décadas que o estudo do campo de escoamento em torno de obstáculos de eixo vertical, vem sendo feito por vários investigadores, dada a importância do tema para a Engenharia Civil, e a complexidade dos fenómenos envolvidos.

Os trabalhos realizados nesta temática pretendem caracterizar o campo de escoamento, nomeadamente o seu sistema de vórtices, em torno de elementos cilíndricos inseridos no seio do escoamento, em canais com fundo fixo ou móvel. O conhecimento disponível, relativo ao escoamento em torno de obstáculos impermeáveis, é bastante alargado, tendo-se focado inicialmente em elementos cilíndricos e mais recentemente em outras formas geométricas.

A modificação dos perfis de velocidade média, de intensidade turbulenta e tensões de Reynolds em torno de um pilar inserido no seio do escoamento, juntamente com a alteração do campo de pressões, traduz-se no aparecimento de uma superfície de enrolamento e de um escoamento descendente a montante do obstáculo. O escoamento descendente origina o vórtice em ferradura, que se propaga para jusante numa esteira turbulenta. Este fenómeno é o principal motor de erosão junto dos pilares e encontros de pontes (Fael, 2008).

Ao nível do estudo do escoamento em torno de estruturas permeáveis, o trabalho é mais escasso, quando comparado com as estruturas impermeáveis. Embora já tenham sido obtidos resultados positivos, na estabilização dos leitos de canais, na proteção de margens de rios e na minimização de erosões junto das fundações de pontes, quando se opta pela implementação de várias medidas com estruturas permeáveis, baseadas em blindagem com gabiões de pedra e enrocamentos. Tang *et al.* (2009), ao estudar a proteção de fundações de pontes, utilizando quadros tetraédricos, e Lu *et al.* (2011), ao caracterizar o escoamento que passava por uma estrutura tetraédrica, mostraram que essa estrutura pode reduzir a velocidade longitudinal do escoamento, a tensão de corte e aumentar a intensidade turbulenta. Estes autores concluíram estar perante uma medida de proteção contra as erosões localizadas, uma vez que os resultados apresentados favoreciam a deposição de sedimentos, através da redução da componente longitudinal da velocidade do escoamento proporcionada pela permeabilidade da forma tetraédrica da estrutura. Em 2008, Leu *et al.*, mostraram como uma estrutura porosa pode ser utilizada para proteger um elemento colocado a jusante desta. Os efeitos positivos proporcionados por estruturas porosas vão sendo reduzidos à medida que o declive do canal aumenta. Nessas condições, torna-se mais difícil à estrutura contrariar as elevadas velocidades de escoamento e os fenómenos que daí advêm.

Outro tipo de estruturas permeáveis, utilizadas em engenharia, para a proteção de taludes de rios, estão associadas a vegetação submersa, que permitem a passagem do escoamento e assim reduzir a velocidade do escoamento próximo do solo, minimizando a erosão e promovendo a deposição de sedimentos (Lu *et al.*, 2011). Os principais fatores que geram esses processos são os efeitos da fronteira lateral e do arranjo da densidade, visível na permeabilidade da estrutura (Chen *et al.*, 2012). Aliado a estes processos de proteção está também a estabilização dos taludes através das raízes da vegetação submersa.

Face ao exposto, pretende-se com este trabalho, contribuir para a compreensão e caracterização do campo de escoamentos, em torno de um elemento cilíndrico poroso, contribuindo para um melhor entendimento da estrutura turbulenta do escoamento junto de estruturas permeáveis.

1.2 Objetivos, metodologia e estrutura da dissertação

De acordo com o que ficou expresso no enquadramento, e face às lacunas existentes no conhecimento desta temática, estabeleceu-se como objetivo geral da presente dissertação, efetuar um estudo sobre o campo de escoamentos, em torno de um elemento cilíndrico permeável, inserido no seio de um escoamento uniforme. Para tal objetivo ser alcançado, definiram-se dois objetivos específicos, a caracterização do escoamento turbulento formado no escoamento com a colocação dos dois elementos cilíndricos, um impermeável e outro permeável, ensaiados separadamente, e a comparação dos resultados obtidos experimentalmente para caracterização da influência da permeabilidade.

As medições do campo de velocidades instantâneas em torno de cada elemento cilíndrico, de diferentes permeabilidades, dividem-se em duas fases. Na primeira fase de medições, o cilindro impermeável foi colocado no centro de uma secção transversal do canal, na qual o escoamento se encontra completamente desenvolvido com o regime uniforme estabelecido. Na caracterização do escoamento em torno do elemento cilíndrico impermeável, definiram-se três planos perpendiculares à direção do escoamento, desde o fundo do canal até à superfície livre deste, localizados a montante, a meio e a jusante do elemento cilíndrico. Nesses planos, mediu-se a componente longitudinal e vertical da velocidade instantânea do escoamento. A segunda fase consistiu em trocar o elemento cilíndrico impermeável pelo permeável e proceder de forma idêntica à primeira fase de medição.

As componentes bidimensionais das velocidades instantâneas do escoamento, em torno dos elementos cilíndricos foram medidas recorrendo a uma técnica de medição não invasiva, baseada no efeito doppler, através do Sistema 3D de Velocimetria Doppler Laser (LDV). O funcionamento do laser consiste na emissão de 1, 2 ou 3 pares de feixes sobre um ponto do escoamento, consoante o número de componentes da velocidade instantânea que se pretendam medir. Nesse ponto, será gerado um volume de medição, a partir do qual são gerados reflexos criados pelas partículas contidas no escoamento, ao intersectarem esse volume. Os reflexos são

registados por um computador, que os traduz numa componente da velocidade instantânea do escoamento, nesse ponto de medição.

Fez-se a análise e processamento dos dados das medições do campo de velocidades instantâneas através de uma filtragem de dados. Seguiu-se a caracterização do campo de velocidades instantâneas, a partir do qual se calcularam as velocidades médias, as intensidades turbulentas, as tensões de Reynolds e tensões tangenciais totais. A análise dos resultados obtidos, permitiu tirar conclusões, da comparação do campo de escoamento em torno de cada pilar e quanto à influência da permeabilidade de um elemento cilíndrico nesse mesmo escoamento.

A estrutura do texto reflete o procedimento adotado para atingir os objetivos do trabalho. Assim, o texto encontra-se estruturado em seis capítulos. O presente capítulo, de explicação geral sobre opções, objetivos e metodologias de desenvolvimento do estudo.

No Capítulo 2 - *Revisão Bibliográfica*, apresenta-se uma análise dos trabalhos existentes sobre o tema, de modo a enquadrá-los no contexto dos conhecimentos atualmente disponíveis.

O Capítulo 3 - *Instalação experimental*, descreve a instalação experimental e os equipamentos de medição utilizados no estudo.

Os procedimentos experimentais adotados neste estudo são apresentados no Capítulo 4 - *Campanha experimental*. Na última secção do capítulo, juntamente com a descrição do procedimento da medição do campo de velocidades, são apresentados os ensaios realizados no presente estudo.

O processo de tratamento realizado aos dados recolhidos no laboratório é descrito no Capítulo 5 - *Processamento de dados*.

No Capítulo 6 - *Caracterização do escoamento em torno de elementos cilíndricos*, procede-se à apresentação, análise e discussão dos resultados.

Finalmente, no Capítulo 7 - *Conclusões e propostas de trabalhos futuros*, são apresentadas as principais conclusões retiradas na elaboração de todo o trabalho que envolveu esta dissertação, quer do ponto de vista da experimentação, quer no que concerne aos resultados obtidos. Incluem-se, ainda, considerações sobre o que poderá ser a continuação da investigação desenvolvida no presente estudo.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Introdução

A revisão bibliográfica está organizada, em 4 secções, nas quais são apresentados os conhecimentos atualmente disponíveis, baseada numa análise a trabalhos existentes sobre o tema. Na Secção 2.2 são apresentados os conceitos relativos a escoamentos turbulentos relevantes para o presente trabalho. Na Secção 2.3 apresentam-se os conhecimentos obtidos em estudos experimentais realizados a pilares circulares impermeáveis. Este capítulo finaliza com a apresentação dos conhecimentos obtidos em trabalhos realizados no âmbito das estruturas permeáveis em escoamentos.

2.2 Escoamento turbulento em canais de leito fixo

Nesta secção pretende-se rever os principais conceitos de escoamentos turbulentos em canais, ao nível da sua estrutura, campos de velocidades e tensões tangenciais, que permitirão caracterizar as condições experimentais em que esta dissertação assenta e interpretar os resultados obtidos.

2.2.1 Estrutura do escoamento

Num escoamento com superfície livre em regime uniforme, a secção líquida, o caudal e a velocidade média são constantes ao longo do percurso e o perfil da superfície livre é paralelo ao perfil do leito do canal.

O regime uniforme com superfície livre apenas é possível em canais com secção e rugosidade constante ao longo do percurso. Num canal com tais condições, onde circula um caudal constante, o escoamento é turbulento e tende para uniforme num trecho intermédio que se encontre suficientemente afastado dos extremos, para que a influencia destes não se faça sentir (Quintela, 1981).

A rugosidade das fronteiras, nomeadamente a rugosidade do fundo e das paredes de um canal, tem grande influência no comportamento dos escoamentos turbulentos, que é observável nos perfis verticais de velocidades. O escoamento de um líquido ao longo dessas fronteiras sólidas apresenta uma velocidade nula, levando à criação de uma região com um forte gradiente de velocidade, perpendicularmente à parede, e conseqüente o aparecimento de tensões tangenciais (Quintela, 1981). A camada limite é a zona onde esses perfis de velocidade são mais influenciados pelos fenómenos associados à viscosidade (Teixeira, 2001).

O conceito de camada limite surgiu em 1904 por intermédio de Prandtl, que o descreveu como sendo a zona adjacente a uma parede onde os efeitos viscosos não podem ser desprezados. Essa zona, apresentada na Fig. 2.1, surge a partir do momento em que se inicia o contacto entre o líquido em movimento e a parede sólida, nesta situação uma placa fina. Em canais, a camada limite desenvolve-se, para jusante, a partir do momento em que o escoamento entra em contacto com o seu leito. Desta forma, Prandtl considerou que no exterior da camada limite, os gradientes de velocidades são pequenos, e que no seu interior há um grande gradiente de velocidades, não podendo por isso desprezar-se a influência das forças de atrito nessa zona. À zona de grandes gradientes de velocidade correspondem tensões de corte elevadas que levam ao retardamento do escoamento (Teixeira, 2011).

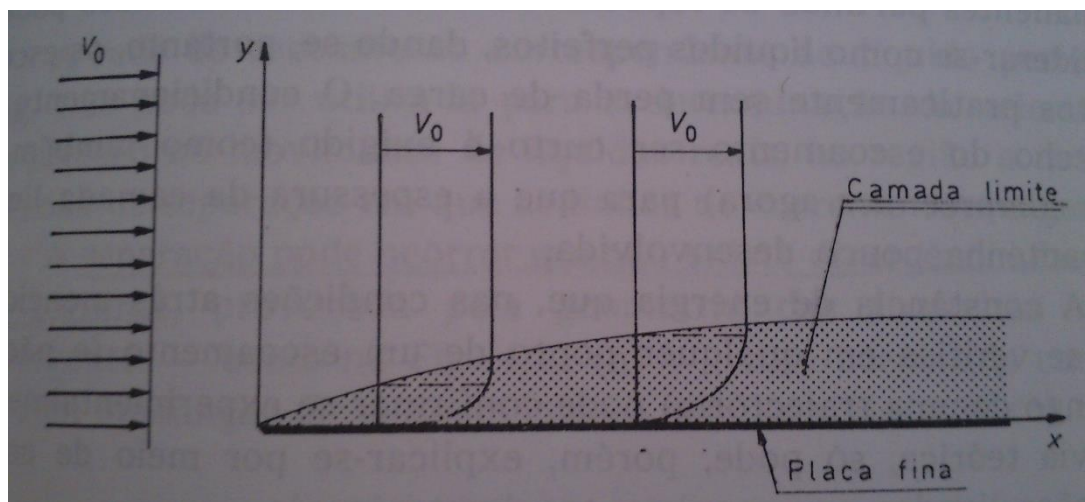


Fig. 2.1- Camada limite provocada por uma placa fina, delgada e paralela à velocidade do escoamento (Quintela, 1981)

Devido à grande influência da rugosidade das fronteiras, no comportamento dos escoamentos turbulentos de fronteira fixa, com altura h , são definidas duas regiões de características distintas. Uma região interior, próxima do fundo do canal ($Z/h \leq 0,2$), ou da parede, sendo Z a posição vertical no canal, onde a estrutura do escoamento se encontra bastante influenciada pela tensão de arrastamento junto ao fundo, τ_0 . Nesta região interior do escoamento, definiram-se três tipos de fronteiras dependentes da rugosidade. Uma denominada fronteira hidráulicamente lisa, dividida em subcamada viscosa, subcamada intermédia e subcamada turbulenta, na qual as perturbações se encontram na subcamada viscosa, outra definida como fronteira de transição e por último, a fronteira hidráulicamente rugosa, onde as perturbações se encontram para além da subcamada viscosa. Outra região mais exterior ($Z/h \geq 0,2$), fora da camada limite, onde só indiretamente se faz sentir o efeito da influência da tensão de arrastamento (Nogueira, 2007 e Teixeira, 2011).

2.2.2 Distribuição da velocidade

Em escoamentos turbulentos com superfície livre, a distribuição de velocidades médias numa vertical, apresenta o seu máximo não à superfície mas um pouco mais abaixo desta. Transversalmente, a máxima velocidade superficial verifica-se na zona central (Quintela, 1981).

A velocidade média numa secção transversal do canal, U_{CS} , define-se como a velocidade do escoamento, considerando a velocidade constante em todos os pontos, que transporta o mesmo caudal, Q , através da mesma secção transversal, A , e é traduzida pela Equação (1),

$$U_{CS} = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Já a velocidade de atrito junto ao fundo do canal, U_* , define-se através da Equação (2) baseada nas dimensões geométricas do canal (Azevedo, 2012),

$$U_* = \sqrt{g \cdot R_h \cdot S_0} \quad (2)$$

em que g é a aceleração da gravidade, R_h é o raio hidráulico da secção transversal do escoamento e S_0 é o declive longitudinal do canal.

Quando o fundo do canal é composto por elementos de dimensões tão pequenas, como é o caso dos fundos em betão, este é considerado como uma fronteira hidráulicamente lisa onde todas as perturbações estão contidas na subcamada viscosa (Nogueira, 2007).

Para escoamentos turbulentos com fronteiras hidráulicamente lisas, quando a camada limite se encontra totalmente desenvolvida, a velocidade diminui em profundidade desde a superfície livre até ao fundo do canal. Nesta situação, o perfil vertical de velocidades longitudinais pode ser representado aproximadamente pela lei logarítmica apresentada na Equação (3) (Fael, 2008),

$$\frac{U}{U_{*(Y)}} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{ZU_{*(Y)}}{\nu}\right) + B \quad (3)$$

em que U , é velocidade média num ponto do escoamento, $U_{*(Y)}$ a velocidade de atrito local, k é a constante universal de Von Kármán, igual a 0,41, Z a posição vertical desse ponto, ν a viscosidade cinemática de um fluido, e B é a constante aditiva da lei logarítmica de distribuição de velocidade. Para escoamentos bidimensionais em superfície livre, toma o valor de 5,3 (M. Filonovich, 2010; Teixeira, 2011 e Azevedo, 2012). Na Fig. 2.2 apresenta-se o diagrama da distribuição de velocidades médias numa vertical.

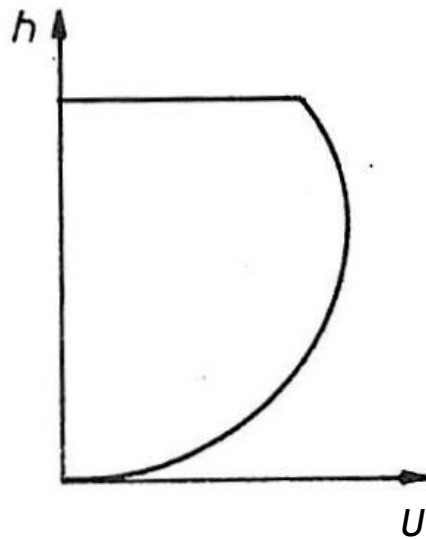


Fig. 2.2- Distribuição de velocidades numa vertical
(adaptada de Quintela, 1981)

A Equação (3), permite calcular a velocidade de atrito local, $U_{*(\gamma)}$, na região interior ($Z/h \leq 0,2$), onde o efeito do atrito é significativo.

2.2.3 Intensidade turbulenta

A turbulência, no seio de um escoamento, caracteriza-se pela presença de vórtices em movimento. Esses movimentos turbulentos são caracterizados por flutuações turbulentas da velocidade do escoamento, u' , ou simplesmente por flutuações turbulentas. Esta flutuação, u' , mostra quanto um registo da componente u da velocidade instantânea num ponto difere da velocidade média, U , nesse ponto. Com base nos valores da componente longitudinal da velocidade instantânea do escoamento, u , em cada ponto de medição, e no respetivo valor médio, U , é possível determinar a flutuação turbulenta, u' , utilizando a Equação (4). O mesmo processo é aplicado à componente w .

$$u' = u - U \quad (4)$$

O valor dessas flutuações correspondem à variação do valor da velocidade em qualquer ponto e em qualquer direção em torno de um valor médio. Um escoamento turbulento é considerado como um movimento aleatório, não organizado, que se sobrepõem a um movimento médio ao longo do tempo (Cardoso, 1998). Quanto maior for u' , em módulo, maior é a agitação de carácter aleatório.

A intensidade turbulenta de cada uma das componentes, U_{rms} e W_{rms} , do vetor da velocidade em cada ponto do escoamento, é dada pela raiz quadrada da média dos quadrados da flutuação turbulenta, como se apresenta na Equação (5), para a componente longitudinal,

$$U_{rms} = \sqrt{\overline{u'^2}} \quad (5)$$

A proporcionalidade de u' , é transportada para a intensidade turbulenta. Sendo o ímpeto de turbulência as características dominantes na erosão e transporte de sedimentos, torna-se relevante determinar as tensões de Reynolds e a tensão total de corte para escoamentos em superfície livre bidimensionais (Bey *et al.*, 2007 in Lu, 2011).

2.2.4 Distribuição das tensões tangenciais

Em escoamentos turbulentos uniformes e bidimensionais, a tensão tangencial, τ , num ponto à distância z do fundo do canal resulta da soma de duas componentes. Uma de origem viscosa, τ_l , e outra de origem turbulenta, τ_t , como mostra a Equação (6)

$$\tau = \tau_l + \tau_t \quad (6)$$

O primeiro termo, τ_l , dado pela Equação (7), representa a tensão tangencial devida à viscosidade dinâmica do fluido, μ ,

$$\tau_l = \mu \frac{du}{dz} \quad (7)$$

sendo du/dz o gradiente de velocidade à distancia z do fundo.

A tensão tangencial devida às flutuações turbulentas da velocidade, designada por tensões de Reynolds, é apresentada no segundo termo da Equação (6) e definida pela Equação (8),

$$\tau_t = -\rho \overline{u'w'} \quad (8)$$

em que $\overline{u'w'}$, representa a média temporal do produto de u' , correspondente ao valor da oscilação em relação à média da velocidade longitudinal, com w' , que apresenta o mesmo conceito de u' mas para a componente w da velocidade. A variável ρ representa a massa volúmica do fluido. Assim, pode-se reescrever a Equação (6) da forma apresentada na Equação (9) (Quintela, 1981 e Cardoso, 1998)

$$\tau = \mu \frac{du}{dz} - \rho \overline{u'w'} \quad (9)$$

Neste tipo de escoamentos, o perfil da tensão tangencial, ou de corte, é linear tal como indicado na Fig. 2.3, iniciando-se em zero junto à superfície livre do escoamento e terminando igual à tensão tangencial no fundo, τ_0 , junto da fronteira fixa. Dentro do perfil linear da tensão de corte, a variação das suas duas componentes com a distância ao fundo do canal pode ser esquematizada como se apresenta na Fig. 2.3.

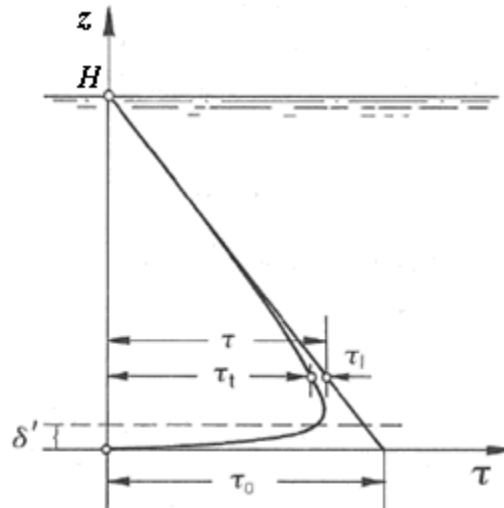


Fig. 2.3- Variação da tensão tangencial e das suas duas componentes com a profundidade de um escoamento (adaptada de Cardoso, 1998 *in* Teixeira, 2011)

Para valores de z superiores à espessura da subcamada viscosa, δ' , a tensão tangencial total é praticamente igual à tensão tangencial de origem turbulenta, desprezando-se a componente da viscosidade dinâmica. Para valores de z inferiores a δ' , a tensão tangencial total é praticamente igual à componente de origem viscosa, desprezando-se a componente turbulenta (Cardoso, 1998).

2.3 Estudos experimentais em pilares cilíndricos impermeáveis

O estudo do escoamento em torno de elementos geométricos, maioritariamente cilíndricos, tem vindo a ser estudado por diversos investigadores. Este tipo de estudos são realizados tanto em canais com leito fixo como em leito móvel, mas maioritariamente com elementos impermeáveis, uma vez que os resultados se destinam a complementar o estudo de pilares e encontros de pontes.

Os primeiros estudos realizados nesta área da engenharia, mostraram que, um escoamento praticamente unidirecional ao encontrar um obstáculo se torna tridimensional. A sua presença provoca modificações dos perfis de velocidade média, de intensidade turbulenta e de tensões de Reynolds (Fael, 2008). No campo do escoamento de aproximação ao cilindro, o vetor velocidade, composto pelas componentes u e w , que vinha apresentando direção praticamente horizontal, perde alguma intensidade, visível na diminuição da componente longitudinal, em toda a altura de água, e torna-se maioritariamente vertical com sentido descendente. Este escoamento descendente ocorre ao longo da parede do cilindro, que ao encontrar o fundo, forma um sistema de vórtices conhecido por vórtice em ferradura. A jusante do elemento cilíndrico é criada uma esteira turbulenta (Shen, 1971; Melville, 1975 *in* Graf & Istiarto, 2002 e Fael, 2008).

Baker, em 1980, começou por investigar as características do vórtice em ferradura em torno de um pilar cilíndrico inserido num escoamento turbulento num canal com leito fixo horizontal. Nessa investigação mediu-se a distribuição de pressões abaixo do vórtice de ferradura e a sua posição foi determinada experimentalmente. Mais tarde, em 1985, concluí que, existem pelo menos dois sistemas de vórtices em ferradura para as condições de escoamento testadas.

Quintela (1981), refere que, para escoamentos em torno de um cilindro, as grandezas características são o diâmetro e a velocidade incidente do movimento não perturbado. Ambas as grandezas definem o número de Reynolds, R_e , que por sua vez, lhe tem associada a configuração do movimento de um fluido a jusante de um corpo.

Considerando o escoamento de um líquido real em torno de um cilindro, como apresentado na Fig. 2.4, este apresenta velocidade nula e pressão máxima no primeiro ponto de contacto entre o escoamento e a parede do cilindro, ponto A. Nos percursos de A até B e de A até C o escoamento considera-se praticamente como irrotacional devido à pequena espessura da camada limite. Nessa região existe um forte gradiente de velocidade segundo a normal à parede e conseqüente aparecimento de tensões tangenciais. A energia cinética, traduzida em velocidade de escoamento, atinge o máximo em B e C e tende para zero de B e C para D à medida que a pressão volta a aumentar. Devido ao consumo de energia ao longo da parede do cilindro a velocidade anula-se em dois pontos simétricos antes de D. A partir desses pontos o escoamento separa-se da parede e dá origem a vórtices. A dimensão dos vórtices, criados na separação do escoamento a jusante do elemento, cresce com R_e . Quando R_e ultrapassa o valor de 50, os vórtices começam a destacar-se do cilindro e a mover-se para jusante, criando uma esteira de vórtices. A partir de $R_e=10^5$, os vórtices começam a desintegrar-se imediatamente após a sua formação e nessa altura o movimento no interior da esteira é completamente turbulento.

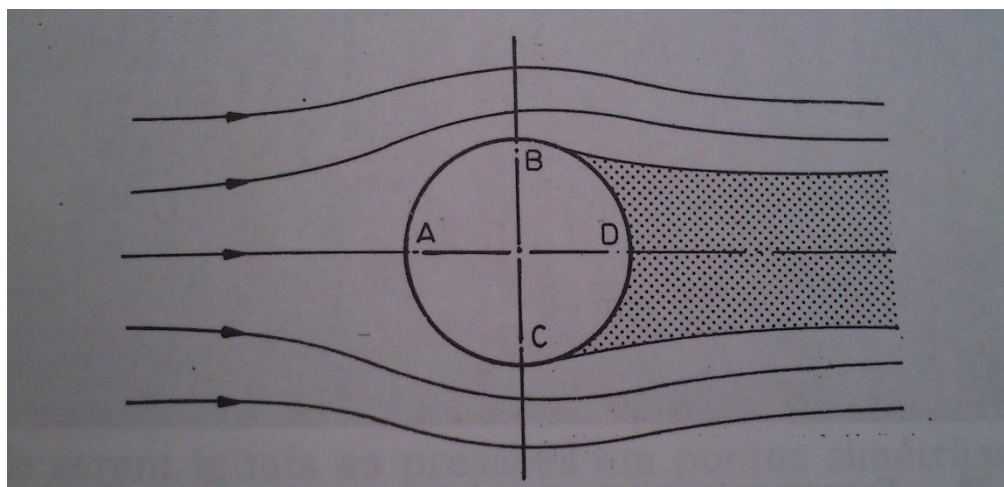


Fig. 2.4- Esteira turbulenta a jusante de um cilindro (Quintela, 1981)

Num escoamento turbulento, a vorticidade encontra-se distribuída por um sistema de vórtices e acompanha o processo de transferência de energia dos vórtices de maiores dimensões para os de menores dimensões. Ou seja, os vórtices de maiores dimensões vão-se subdividindo em vórtices de menores dimensões, que também se subdividem noutros de dimensões ainda menores e assim sucessivamente, fenómeno este denominado por processo de estiramento dos vórtices (Quintela, 1981).

Dargahi (1989), depois de estudos experimentais realizados ao campo de escoamentos em torno de um cilindro vertical colocado num canal de fundo liso, mostrou que, a região de separação é caracterizada por um sistema de vórtices em ferradura que são eliminados quase periodicamente. Com esses ensaios, realizados com um R_e a variar de $6,6E3$ a $65E3$ e definidos com base no diâmetro do cilindro, pôde afirmar que, o número de vórtices e a complexidade do escoamento aumenta com o do número de Reynolds, mas que a dimensão do sistema de vórtices é maioritariamente dependente do diâmetro do cilindro e não tanto do número de Reynolds.

Após terem calculado o campo de vorticidades em torno de um cilindro, Graf e Yulistiyanto, estudaram a evolução do vórtice em ferradura e concluíram que, para maiores velocidades de escoamento, maior é a intensidade do vórtice e mais próximo do cilindro se encontra (Graf & Yulistiyanto, 1998). Posteriormente, Graf, mostrou que, a jusante do cilindro, existe um fluxo ascendente do escoamento, que permite ao perfil de velocidades do mesmo voltar a apresentar uma forma logarítmica, em simultâneo com uma diminuição da vorticidade (Graf & Istiarto, 2002).

Unger e Hager (2007), mostraram que, a montante de um pilar o escoamento cria um ponto de estagnação, a partir do qual uma parte do escoamento toma um sentido ascendente, criando uma zona de recirculação, que eleva o nível da superfície do escoamento, enquanto que, outra toma o sentido descendente que ao colidir com o fundo cria o vórtice responsável pelo desencadeamento das erosões localizadas. Como apresentado por Quintela, o fenómeno de separação observa-se em toda a superfície lateral dos pilares, de onde se desprendem os já referidos vórtices na zona de esteira turbulenta. Estes vórtices de esteira transportam, em suspensão no sentido de jusante, o material do fundo erodido a montante pelo vórtice em ferradura (Fael, 2008). A Fig. 2.5 pretende apresentar a estrutura o escoamento resultante da presença dos pilares circulares impermeáveis.

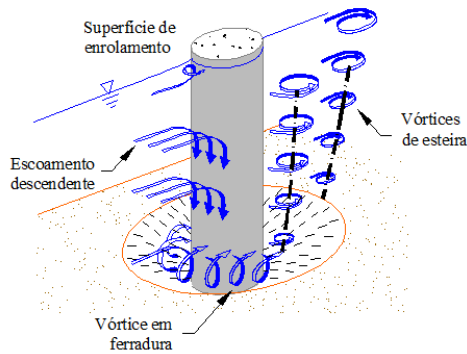


Fig. 2.5- Estrutura do escoamento junto de pilares (Melville e Coleman, 2000 *in* Fael, 2008)

A jusante do pilar, e próximo do fundo do canal, a velocidade do escoamento diminui 20 a 30% do valor da velocidade média do escoamento de aproximação, devido ao efeito de abrigo que o pilar cria a montante. À semelhança do escoamento sem a presença de obstáculos, também a velocidade longitudinal a montante e a jusante do pilar, são maiores nos planos superiores que nos inferiores devido à influência da rugosidade do fundo (Ataie-Ashtiani & Aslani-Kordkandi, 2013).

Nogueira (2007) observou que, quando o escoamento de aproximação é praticamente potencial, sem a desenvolvimento da camada limite, esta também não existe a montante do pilar. Nestas condições, não foram observados o escoamento descendente nem o vórtice ferradura. Assim, pode concluir-se que estes se encontram dependentes da vorticidade já presente na camada limite. Com a colocação do pilar cilíndrico numa zona do escoamento em que, a camada limite apresentava algum desenvolvimento, o vórtice em ferradura foi observado, embora sem carácter permanente. Estabeleceu-se uma relação crescente entre o tamanho do vórtice ferradura e a espessura da camada limite.

2.4 Estudo em estruturas permeáveis

O desenvolvimento do conhecimento sobre o campo de escoamentos, em torno de estruturas permeáveis, permitiu implementar várias medidas, baseadas em blindagem com gabiões de pedra e enrocamentos, na estabilização dos leitos dos canais, na proteção das margens dos rios e na minimização das erosões localizadas nas fundações de pontes. Outro tipo de estruturas permeáveis, utilizadas em engenharia, estão associadas a vegetação submersa, que permitem a passagem do escoamento e assim reduzir a velocidade ao nível do solo, minimizando a erosão e motivando a deposição de sedimentos (Lu *et al.*, 2011).

De facto, o uso de estruturas porosas ou permeáveis também altera o campo do escoamento junto aos obstáculos. Os efeitos destas estruturas são semelhantes aos que se observam na presença de árvores e arbustos com copas dotadas de alguma permeabilidade. Nesses casos, o escoamento é semelhante ao que ocorre em meio poroso, denominado por *bleed-flow*, e se encontra apresentado na Fig. 2.6. A permeabilidade contribui para reduzir a velocidade de

escoamento, o nível de turbulência e a dimensão dos vórtices em torno das copas. Este fenômeno induz o prolongamento da zona de esteira para jusante, com velocidades menores, comparativamente com elementos impermeáveis. Com velocidades mais baixas, as tensões de arrastamento junto ao fundo dos cursos de água também serão menores, permitindo desta forma o desenvolvimento da vegetação rasteira, a sedimentação e deposição no leito dos rios (Schnauder & Moggridge, 2009).

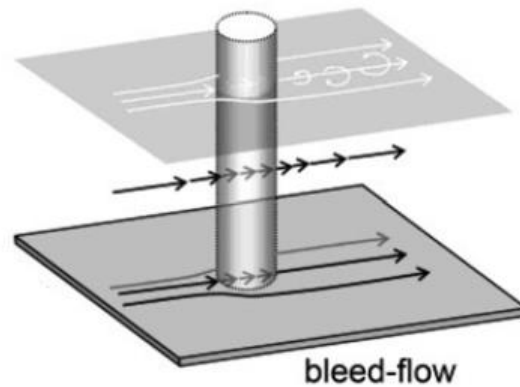


Fig. 2.6- Esquema do escoamento *bleed-flow* em torno de uma estrutura porosa (Schnauder & Moggridge, 2009)

A análise da permeabilidade em trabalhos laboratoriais anteriores tem sido simulada com a utilização de esferas. Inicialmente apenas com a simulação de leitos de rios permeáveis e impermeáveis (Manes *et al.*, 2009 e Pokrajac & Manes, 2009) e mais tarde com a criação de uma barreira permeável (Leu *et al.* 2008). Na sequência desses trabalhos, os mesmos autores, constataram que o aumento da porosidade nessas estruturas, inseridas no seio do escoamento, contribuiu para aumentar a resistência ao escoamento, modificando a estrutura deste na vizinhança dos elementos rugosos e dessa forma contribuir para a diminuição da intensidade turbulenta, da energia cinética turbulenta e das tensões de Reynolds. O escoamento que passa pelas aberturas deste tipo de estruturas, o já referido *bleed-flow*, aumenta com o aumento da permeabilidade. O aumento da porosidade, através do rearranjo das esferas ou da utilização de esferas com diâmetro diferente, permite aumentar a superfície de contacto entre estas e o escoamento, o que lhe confere uma maior resistência ao escoamento, levando a uma menor velocidade no interior da estrutura que depois se prolonga para jusante. Concluiu-se que, estruturas porosas têm boas características para reduzir a velocidade de escoamento com pequena intensidade turbulenta e assim criar-se um efeito tipo abrigo para proteger um objeto colocado a jusante desse tipo de estruturas.

3 Instalação experimental e equipamentos de medição

3.1 Considerações gerais

Neste capítulo procede-se à descrição da instalação experimental e dos equipamentos de medição utilizados na realização da componente experimental da dissertação. Esta foi realizada no canal de Estruturas Hidráulicas, do Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas (LHFE), do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), da Universidade da Beira Interior (UBI).

Tendo em conta o objetivo geral do estudo, apresentado e definido no Capítulo 1, facilmente se compreende que o trabalho experimental desenvolvido, tem em vista a obtenção de dados relativos à turbulência gerada no seio do escoamento, em superfície livre, em regime uniforme, devido à inserção de um elemento cilíndrico com diferentes permeabilidades.

3.2 Descrição do canal de Estruturas Hidráulicas

Na Fig. 3.1 apresenta-se uma vista geral do canal de Estruturas Hidráulicas. O canal é horizontal, tem 11,60 m de comprimento, 0,6 m de altura e 0,79 m de largura útil, suportado por uma estrutura de betão.

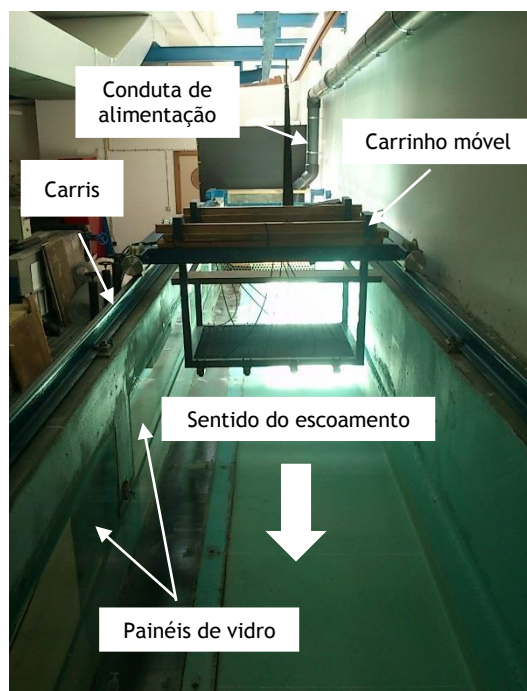


Fig. 3.1- Vista geral do canal

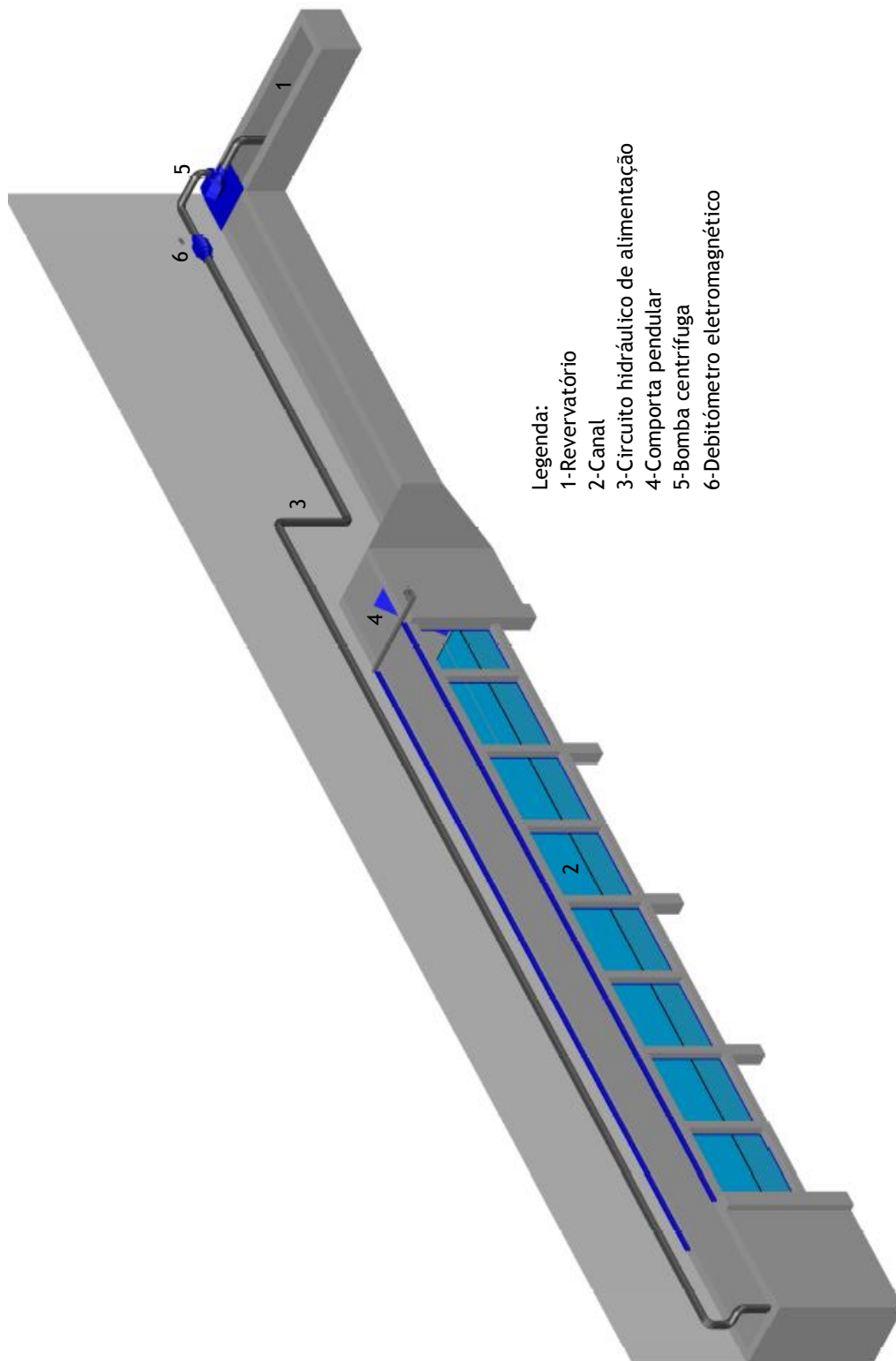


Fig. 3.2- Vista 3D do canal

A Fig. 3.2 representa o esquema do canal e os itens legendados são referidos ao longo do texto para identificação dos elementos que integram a instalação.

O canal é constituído pelo reservatório [1], o canal propriamente dito [2] e o circuito hidráulico de alimentação [3].

O reservatório, com forma paralelepípedica e capacidade útil de 3 m³, alimenta o canal por intermédio de um grupo eletrobomba. O reservatório permite manter um nível de água constante, de modo a evitar flutuações no caudal de alimentação do canal. Localiza-se a jusante do canal hidráulico, ao nível do piso do laboratório, tem uma altura média de 0,70 m e uma largura de 0,5 m.

A estrutura do canal é essencialmente de betão, à exceção da parede lateral direita formada por 8 painéis de vidro, que permitem a visualização do escoamento ao longo do canal e a realização das medições a partir do exterior. Para evitar os efeitos que os bordos dos painéis de vidro podem criar sobre o escoamento, foi colocada uma lâmina de acrílico com uma espessura de 0,01 m ao longo do canal (ver Fig. 3.3).

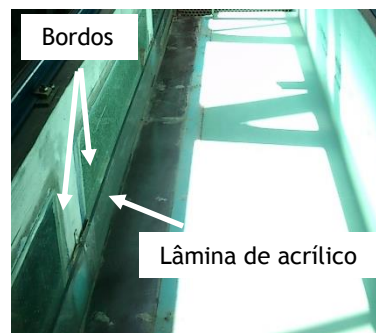


Fig. 3.3- Pormenor da lâmina de acrílico

À entrada do canal existe uma rampa ascendente no sentido do escoamento, cuja função é garantir a aceleração do escoamento num troço relativamente curto, contribuindo para a sua distribuição, o mais uniforme possível, na secção transversal de entrada do canal. Imediatamente a montante desta secção, foram colocados tubos cilíndricos com 2,5 cm de diâmetro, designados por difusores, numa configuração em favo, com o objetivo de complementar a função da rampa ascendente e contribuir para o alinhamento e a tranquilização do escoamento (ver Fig. 3.4).

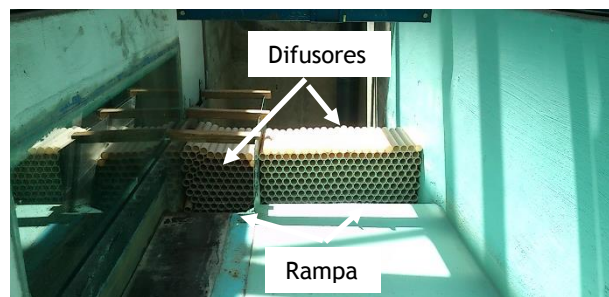


Fig. 3.4- Entrada do canal, vista de jusante

Na secção final do canal existe uma comporta pendular [4], com a mesma largura do canal, que permite regular os níveis de água no canal e é acionada manualmente por meio de um guincho com cabo e roldana (ver Fig. 3.5).

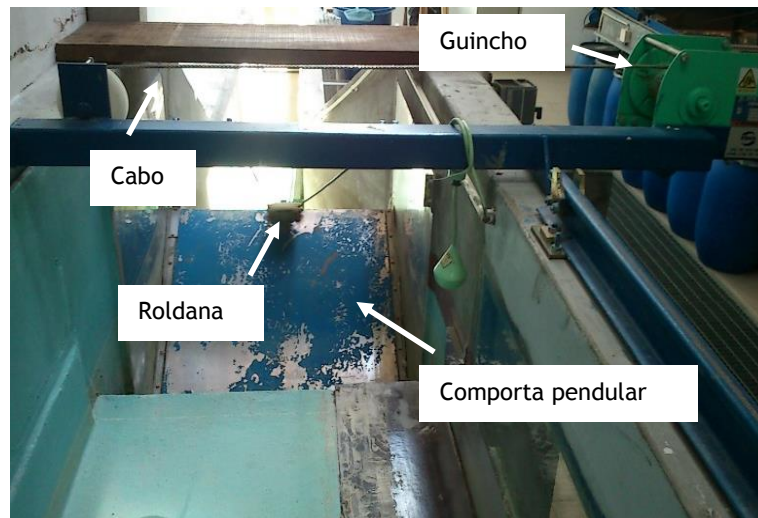


Fig. 3.5- Trecho de jusante do canal, comporta pendular, vista de montante

O canal encontra-se equipado com um carrinho móvel (ver Fig. 3.1) que se desloca ao longo do comprimento útil do canal, apoiando-se em dois carris nivelados existentes no topo das paredes laterais do canal, e serve de suporte a equipamentos de medição, nomeadamente, ao hidrómetro de ponta direita.

A instalação está equipada de um circuito hidráulico de alimentação independente, que pode movimentar caudais que variam entre 0 e 104 m³/h. É constituído pelo um debitómetro eletromagnético [6], por uma conduta de PVC [5] com 120 mm de diâmetro interno e um grupo eletrobomba (bomba centrífuga Pentax CM 65 - 125B).

3.3 Equipamentos de medição

3.3.1 Considerações gerais

No trabalho experimental procedeu-se à medição de caudais, de níveis da superfície livre do escoamento, de níveis do fundo do canal e de velocidades do escoamento em torno dos obstáculos.

Descreve-se seguidamente, de forma sucinta, os equipamentos de medição utilizados no trabalho experimental.

3.3.2 Caudal e altura de escoamento

O trabalho experimental foi realizado com o caudal máximo debitado pela eletrobomba instalada no circuito hidráulico de alimentação. Esse caudal foi de aproximadamente $104 \text{ m}^3/\text{h}$, medido através de um caudalímetro eletromagnético instalado na conduta do circuito de alimentação (ver Fig. 3.6).



Fig. 3.6- Caudalímetro eletromagnético instalado na tubagem do circuito de alimentação

As medições dos níveis da superfície livre do escoamento e dos níveis do fundo do canal foram realizadas com um hidrómetro de ponta direita (ver Fig. 3.7) instalado num suporte assente no carro móvel. Com os valores dessas medições, foi possível obter as alturas do escoamento ao longo do canal através diferença das medições dos níveis da superfície livre do escoamento e o fundo do canal.

O hidrómetro possui um nómio que permite realizar leituras com erros de medição da ordem de $\pm 0,1 \text{ mm}$. Embora, devido aos níveis oscilantes da superfície livre do escoamento, é prudente considerar que se mediram alturas de escoamento com erros de 1 mm (Fael, 2008).



Fig. 3.7- Hidrómetro instalado no carrinho do canal

3.3.3 Medição de campos de velocidades instantâneas - Conceitos do Sistema 3D de Velocimetria Doppler Laser (LDV)

A medição das velocidades instantâneas do escoamento, em torno dos elementos cilíndricos, foi realizada com um Sistema 3D de Velocimetria Doppler Laser (em terminologia inglesa - *Laser Doppler Velocimeter* (LDV)). Trata-se de uma técnica de medição não invasiva do escoamento, baseada no efeito doppler, permitindo assim aumentar a precisão das medições realizadas. O LDV mede a velocidade instantânea das partículas que se encontram no escoamento, que ao serem de tão pequenas dimensões, permite assumir-se que a velocidade do escoamento é a mesma das partículas (TSI, 2006). A possibilidade de realizar a medição das várias componentes da velocidade instantânea do escoamento, ponto a ponto, permite ter uma melhor resolução espacial com uma baixa percentagem de erro, comparativamente com outras técnicas de medição invasivas (Urbano & Téllez, 2013).

O LDV apresentado na Fig. 3.8, é um modelo da marca TSI, composto por um sistema Analisador de Partículas por Efeito Doppler (em terminologia inglesa - *Phase Doppler Particle Analyzer* (PDPA)), constituído pelos componentes FSA3500/4000 Processador de Sinal e PDM1000 Modulo Foto Detetor (em terminologia inglesa - *Photo Detector Module* (PDM)) (TSI, 2005b). Ao sistema LDV/PDPA encontra-se ligado um emissor laser Innova 70 C de Árgon, com uma potência de 1 W, que permite a emissão de um feixe principal subdividido em 3 pares de feixes pelo elemento FBL-2 Separador de Feixe Multicolor (ver Fig(s). 3.9 e 3.10). Este sistema é composto por duas sondas (ver Fig. 3.11), que ao emitirem os seus feixes, quando estes se cruzam num mesmo ponto criam, um volume de medição onde são medidas as três componentes da velocidade instantânea. Esse volume de medição corresponde a um ponto de medição no escoamento (TSI, 2005a).



Fig. 3.8- Equipamentos PDM 100 e FSA 3500



Fig. 3.9- Laser Innova 70 C de Árgon



Fig. 3.10- FBL-2 Multicolor Beam Separator

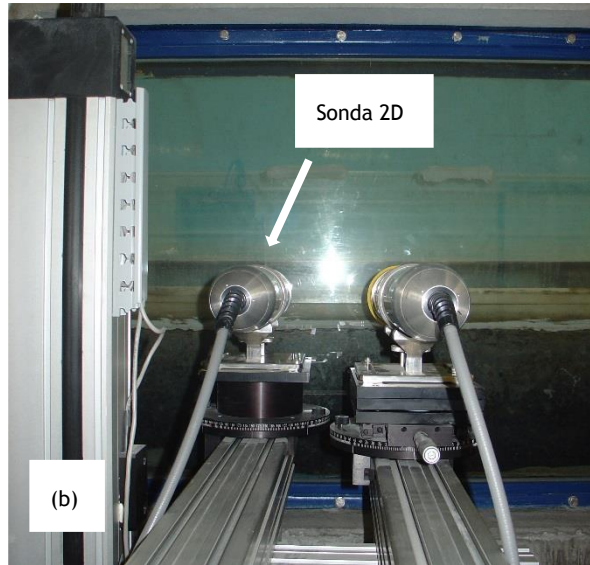


Fig. 3.11- (a) Vista lateral das duas sondas do LDV e (b) perspectiva das mesmas sondas

As sondas do LDV estão instaladas num sistema de posicionamento 3D (ver Fig. 3.12), controlado através de um computador portátil com software adequado e que permite o seu posicionamento com uma precisão de 0,01 mm em cada direção, possibilitando assim colocar o volume de medição num ponto pretendido do escoamento através da introdução das respetivas coordenadas tridimensionais, de forma manual ou automática. Depois de fixo o volume de medição no ponto pretendido, a medição das respetivas componentes do vetor da velocidade num ponto do escoamento é iniciada e prolonga-se nessa posição segundo o intervalo de tempo considerado.



Fig. 3.12- Sistema de posicionamento 3D que possibilita movimentar a sonda do LDV

O funcionamento do sistema LDV/PDPA consiste na transmissão de um sinal ótico, nomeadamente uma sequência de reflexos capturados pelo sistema, oriundos do volume de medição criado pelos feixes das sondas quando este sofre interferência de uma partícula, para o PDM, que por sua vez o transmite através de sinal eletrónico para o FSA Processador de Sinal. Ao receber esse sinal, o FSA extrai dele informação como frequência, período, *burst transit time* e *burst arrival time* e envia-a ao computador (ver Fig. 3.13).



Fig. 3.13- Layout do Software FlowSizer™ onde se realizou a recolha de dados

Os dados são analisados no computador através do programa FlowSizer™ onde é apresentada a análise detalhada referente ao instante de medição, coordenadas do ponto e componentes da velocidade instantânea nesse ponto (TSI, 2005b).

Para que o sistema possa determinar o sentido da partícula que atravessa o volume de medição, a frequência de um dos feixes necessários para a medição da velocidade é modificada. Nesse feixe a frequência é modificada com o aumento em 40 MHz, que provoca a mudança nas ‘franjas’ formadas no volume de medição (ver Fig. 3.14 (b)) (Azevedo, 2011). Essas franjas encontram-se em movimento, e quando uma partícula atravessa o volume de medição, a frequência com que a luz é refletida indica a velocidade e o sentido da partícula (TSI, 2006).

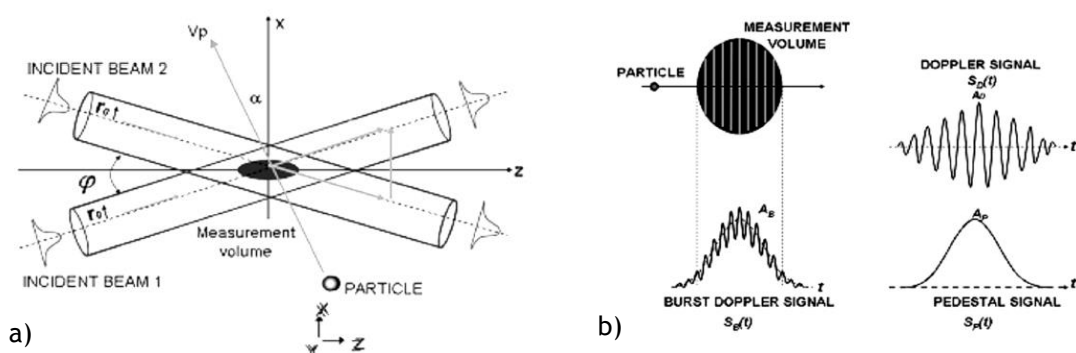


Fig. 3.14- (a) Esquema do volume de medição criado por um par de feixes e (b) sinal criado por uma partícula num sistema LDV (Urbano & Téllez, 2011).

Neste estudo foi apenas utilizada uma das sondas, nomeadamente a sonda 2D apresentada na Fig. 3.11, que permitiu a medição das duas componentes do vetor velocidade do escoamento, em torno dos elementos prismáticos, nomeadamente as componentes longitudinal e vertical do escoamento, u e w , respetivamente. Cada componente da velocidade é medida por um par de feixes emitidos pela sonda 2D do LDV, quando estes criam o já referido volume de medição (ver Fig. 3.15). Na figura, os feixes a verde correspondem à componente w e os feixes a azul correspondem à componente u . Ou seja, num ponto de medição são registadas separadamente, as duas componentes da velocidade instantânea pretendidas, sempre que as partículas transportadas na água intersestavam uma componente do volume de medição (ver Fig. 3.14 (a)).

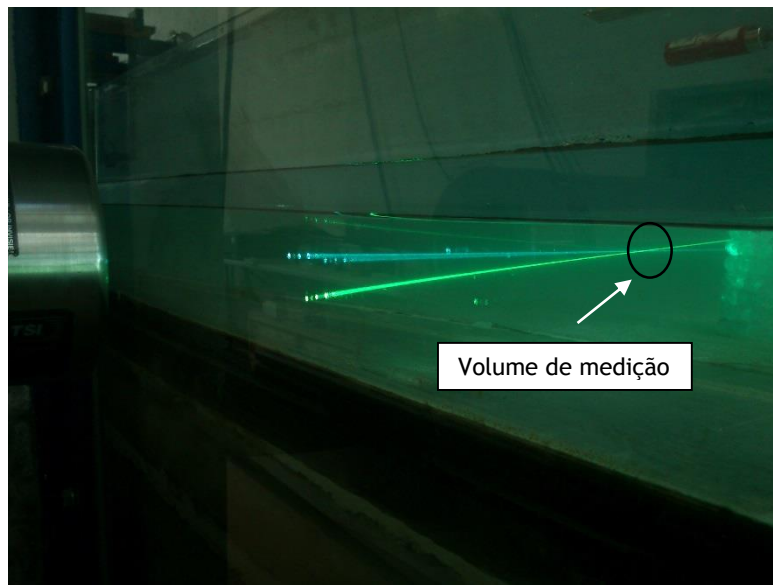


Fig. 3.15- Feixes emitidos pela sonda 2D e criação do volume de medição

4 Campanha experimental

4.1 Considerações gerais

Neste capítulo apresentam-se as condições para as quais foram desenvolvidos os ensaios experimentais, nos quais é medida a velocidade instantânea do escoamento em torno de cada um dos elementos cilíndricos, bem como a apresentação e descrição desses elementos. Faz ainda parte da campanha experimental o procedimento efetuado antes da medição do campo de velocidades, que permitiu a obtenção do regime de escoamento uniforme no canal e a calibração do LDV.

4.2 Descrição dos elementos cilíndricos

Para a análise da influência da permeabilidade do obstáculo na estrutura turbulenta do escoamento, em torno de um elemento rígido com forma cilíndrica, foram utilizados dois elementos cilíndricos com permeabilidades diferentes (ver Fig. 4.1). Um impermeável, em PVC, simulando-se desta forma o tradicional elemento cilíndrico utilizado nas obras de engenharia civil, e um permeável construído com esferas de vidro, pretendendo simular um elemento cilíndrico em material rochoso. O uso de esferas torna a geometria dos poros muito idealizada e portanto diferente da geometria aleatória encontrada em camadas de cascalhos naturais. Embora esse efeito localizado ao nível do poro, possa ser diferente do real, o efeito ao nível global encontra-se muito próximo do real. A geometria regular facilita a identificação das principais características do escoamento turbulento ao nível de toda a fronteira da estrutura. A utilização de esferas, para simular os constituintes de elementos em enrocamento ou em forma de gabião, irá facilitar a modelação numérica desses elementos (Pokrajac & Manes, 2009).

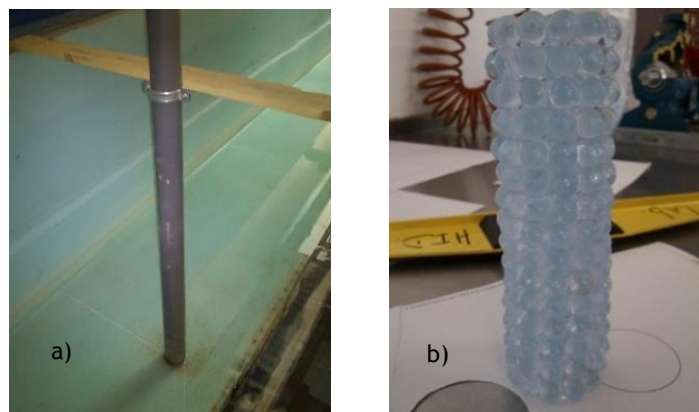


Fig. 4.1- Elementos cilíndricos a) impermeável e b) permeável

Ambos os cilindros têm um diâmetro de 50 mm, o que permite garantir que a relação entre o diâmetro do elemento cilíndrico e a largura do canal é superior a 6,5 e desta forma, garantir que as paredes do canal não têm influência sobre a turbulência do escoamento em torno desse

elemento (Ataie-Ashtiani & Aslani-Kordkandi, 2013). O elemento cilíndrico permeável foi construído com esferas de vidro com 10 mm de diâmetro. A estrutura do elemento permeável é regular em altura e apresenta uma porosidade, ε , de aproximadamente 49,6 %. A porosidade foi determinada pela equação:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} \quad (10)$$

em que V_v representa o volume de vazios ao longo do escoamento e V_t o volume total de um estrutura sólida cilíndrica com a mesma altura. Para uma melhor percepção do elemento cilíndrico permeável apresentado na Fig. 4.1 b), apresentam-se na Fig. 4.2 as vistas 3D, lateral e topo do referido elemento.

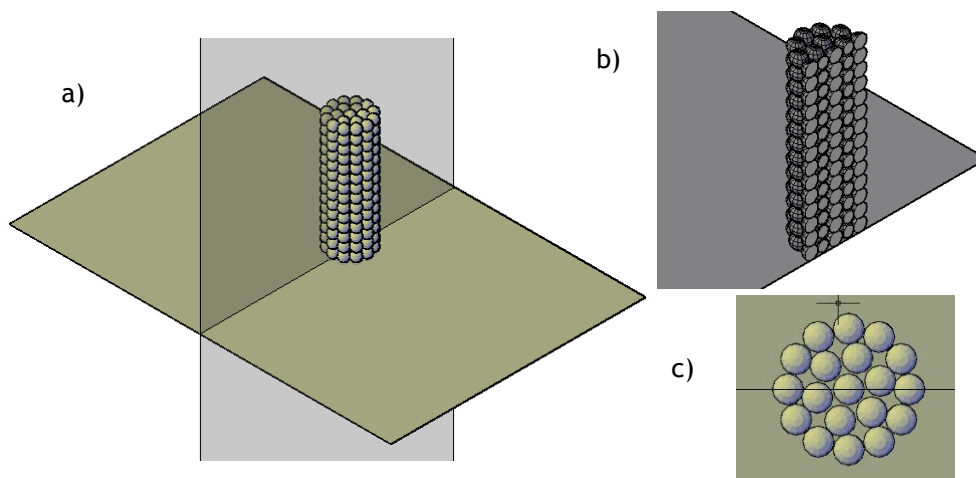


Fig. 4.2- Vistas do elemento cilíndrico permeável, a) 3D; b) Corte; c) Topo

Cada elemento foi ensaiado isoladamente, no centro da secção transversal do canal, a uma distância de 9,0 m da entrada do canal, para que a medição das componentes dos campos de velocidades instantâneas do escoamento, com o sistema LDV, seja possível de ser realizada até ao centro do elemento. Ao colocar os elementos cilíndricos nessa secção transversal, garante-se que o escoamento se encontra totalmente desenvolvido, ou seja, a camada limite ocupa toda a altura do escoamento, antes de chegar à zona de ensaios (Azevedo *et al.*, 2012) e que não existe influência do posicionamento da comporta pendular. Os elementos cilíndricos encontravam-se perpendiculares ao fundo do canal e estavam submersos no escoamento até uma altura de 74,2 mm, a mesma da superfície livre do escoamento de regime uniforme.

4.3 Obtenção do regime uniforme

Os ensaios experimentais realizados no âmbito desta dissertação foram efetuados em condições de escoamento em regime uniforme. As condições de regime uniforme garantem que as alturas de água, o caudal e a velocidade se mantêm constantes ao longo das secções transversais do canal. Nestas condições, é possível comparar resultados entre ensaios experimentais com diferentes configurações, permitindo concluir que as possíveis diferenças entre as velocidades

instantâneas junto aos obstáculos, obtidas nas medições, apenas se devem à presença dos diferentes elementos cilíndricos inseridos no seio do escoamento e não a outros aspetos que não são objeto de estudo neste trabalho. Após a estabilização do caudal, a condição de regime uniforme foi estabelecida quando o declive da superfície livre do escoamento igualou o declive do fundo do canal, e conseqüentemente a altura de escoamento se mantém constante nos pontos de medição.

A tarefa de estabelecer o regime uniforme consistiu nas medições das cotas do fundo do canal e da superfície livre do escoamento, tendo presente que o caudal utilizado corresponde ao valor máximo do caudal debitado pelo grupo eletrobomba, aproximadamente 104 m³/h. A medição das cotas do fundo do canal e da superfície livre do escoamento foram realizadas com o hidrómetro de ponta direita apresentado na Fig. 3.6. Essas duas medições permitiram determinar o declive do canal e o declive da superfície livre do escoamento, respetivamente. A diferença entre as duas medições determinou a altura de água média do escoamento ao longo do canal.

As medições das cotas do fundo do canal e da superfície livre foram efetuadas no centro da secção transversal do canal, ao longo dos 11,60 m de comprimento longitudinal e espaçadas de meio metro, com o hidrómetro instalado no carrinho móvel que se desloca através dos carris existentes no topo das paredes do canal. A altura da superfície livre do escoamento foi a condicionante para a obtenção do regime uniforme. Esta foi controlada mediante a regulação da comporta que se encontra na extremidade de jusante do canal e permitia a subida ou descida do nível de água.

Uma vez que o canal é horizontal, foi criado um fundo falso em argamassa, que lhe conferisse um ligeiro declive longitudinal, de modo a criar condições para que fosse possível estabelecer o regime uniforme. O fundo fixo construído no canal apresenta um declive longitudinal de 0,0912 %.

O regime uniforme considerou-se estabelecido, quando, no centro da secção transversal do canal, o declive da superfície livre do escoamento, calculado com as respetivas cotas medidas, igualava o declive longitudinal do fundo fixo, -0,0912 %. Ao regime uniforme correspondeu uma altura média de escoamento, h , de 74,2 mm, que se manteve constante ao longo de todos os ensaios. O escoamento, para além de uniforme, pode ser considerado bidimensional uma vez que verifica a condição $b/h > 5$, sendo b a largura útil do canal (Graf & Yulistiyanto, 1998).

Na Tabela 1 apresentam-se as condições experimentais do escoamento turbulento em regime uniforme, em que as medições dos campos de velocidades instantâneas foram realizadas. A velocidade média do escoamento, U_{cs} , e a velocidade de atrito junto ao fundo, U_* , foram determinadas pelas Equações (1) e (2), respetivamente. Os números de Reynolds e de Froude foram calculados pelas equações $Re = U_{cs}R_h/\nu$ (onde R_h representa o raio hidráulico, igual a 0,0624 m, e ν a viscosidade cinemática da água, igual a 7.96E-7 m²/s, para T= 30°C) e $F_r = U_{cs}/\sqrt{gh}$ (onde g é a aceleração da gravidade, igual a 9,8 m/s²), respetivamente.

Tabela 1- Condições experimentais

Q (m^3/s)	h (m)	A (m^2)	U_{CS} (m/s)	U^* (m/s)	Re ($\times 10^4$)	F_r
0,0289	0,0742	0,0586	0,4932	0,0241	3,8663	0,5784

4.4 Calibração do Sistema 3D de Velocimetria Doopler Laser (LDV)

A calibração do LDV consistiu na medição da potência de cada feixe com o recurso ao medidor de potência apresentado na Fig. 4.3. A qualidade das medições é melhorada com o aumento de potência dos feixes do LDV. No decorrer da campanha experimental houve a necessidade de se calibrar o laser duas vezes, correspondentes aos dois ensaios realizados.

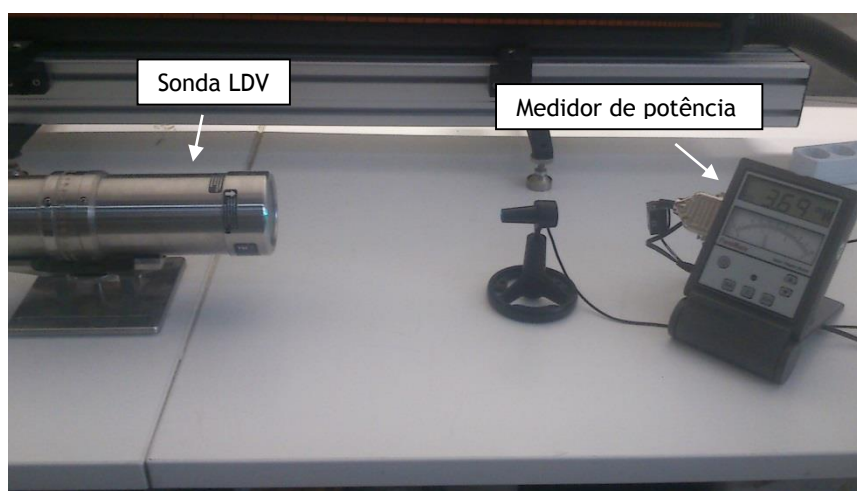


Fig. 4.3- Calibração de um feixe do LDV com recurso a um medidor de potência

4.5 Medições dos campos de velocidades instantâneas junto aos obstáculos

As medições dos campos de velocidades instantâneas foram realizadas com o LDV, para cada um dos elementos cilíndricos, impermeável (Ensaio 1) e permeável (Ensaio 2) (ver Fig. 4.4).

Os dados recolhidos nos dois ensaios seguem o mesmo procedimento experimental, para que, a análise da influência da permeabilidade dos elementos cilíndricos possa ser efetuada, através da comparação das medições realizadas em cada elemento.

As medições de velocidades foram realizadas com o LDV 70C da serie Argón, com uma potência de 1 W. As componentes das velocidades instantâneas do escoamento são obtidas através da interpretação dos pulsos criados pela passagem de partículas, que acompanham o escoamento no volume de medição e o programa FlowSizer™ transmite as coordenadas dos pontos, previamente definidas, que formam a malha de medição de cada uma das secções

apresentadas. Os dados obtidos em cada ponto da malha são também interpretados pelo programa FlowSizer™.

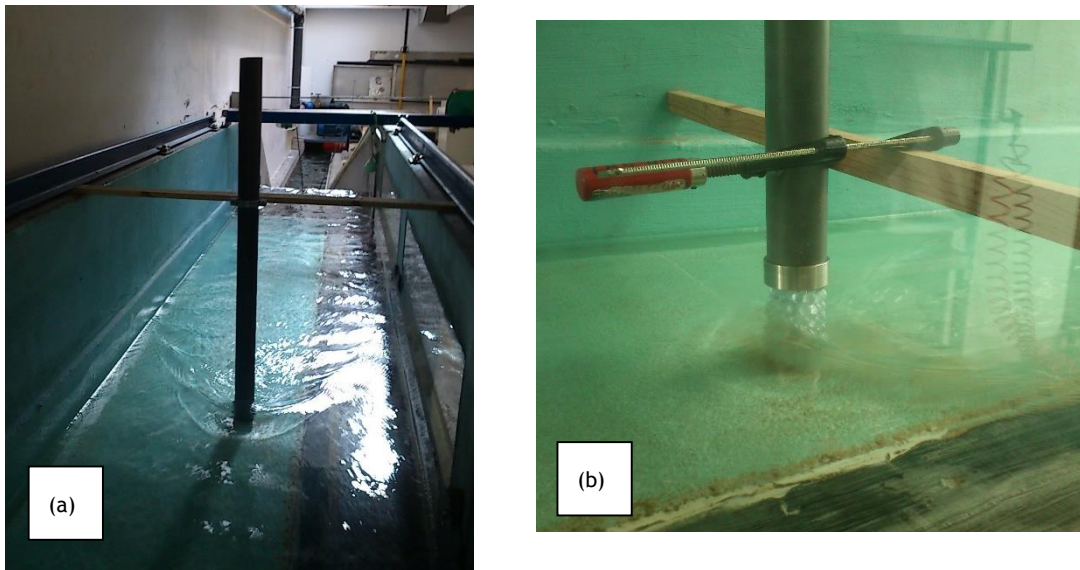


Fig. 4.4- (a) Ensaio 1 - Pilar impermeável e (b) Ensaio 2 - Pilar permeável

A colocação do pilar ao meio da secção transversal do canal permitiu tirar partido da simetria do canal, e desta forma, apenas se mediram os pontos numa malha definida desde a janela em painéis de vidro até ao centro do canal. Cada medição respeita uma malha de pontos distribuídos por uma secção transversal.

A malha apresenta uma forma retangular, onde se definiram 425 pontos de medição, distribuídos por 17 verticais. Cada vertical, formada por 25 pontos, desenvolve-se desde o fundo do canal até à superfície livre do escoamento, com maior concentração de pontos nos primeiros 20 % da altura de água. Esta distribuição de pontos permitirá determinar, de forma mais precisa, a velocidade de atrito do escoamento. Cada ponto foi medido durante 210 segundos, ao longo dos quais o laser ia transmitindo os pulsos gerados no volume de medição ao programa FlowSizer™ para que este os interpretasse (Azevedo *et al*, 2012).

Para cada condição de ensaio, foram realizadas medições em três secções transversais, nas proximidades da secção transversal localizadas a 9,0 m da secção de entrada do canal. A malha dos pontos de medição utilizada está apresentada na Fig. 4.5.

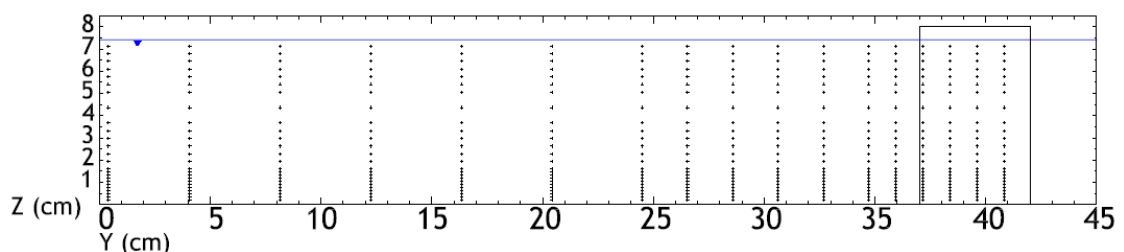


Fig. 4.5- Malha de medição adotada nas secções transversais de montante e jusante

Nos ensaios realizados, mediram-se, para cada elemento cilíndrico, as três secções transversais apresentadas na Fig. 4.6. Disposto as secções transversais a montante, ao centro e a jusante de um elemento cilíndrico, tem-se uma melhor caracterização do escoamento em torno dele. A secção do centro do elemento vertical apresenta uma malha ligeiramente diferente, na medida que, apenas se desenvolve desde a janela até à fronteira do elemento ensaiado.

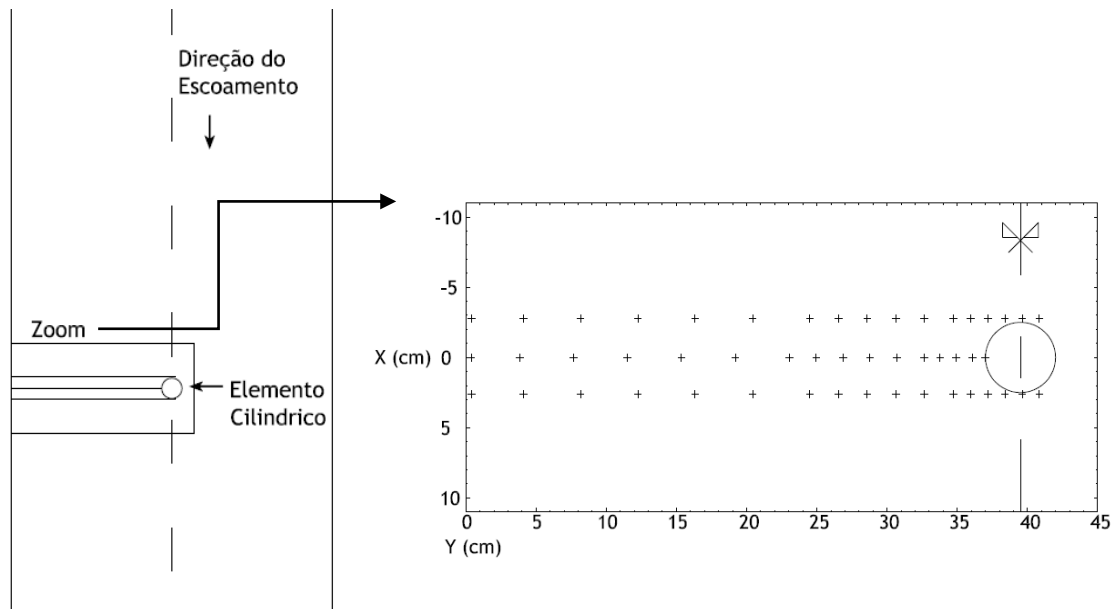


Fig. 4.6- Esquema de medição em planta e respetivo pormenor

A secção de medição, a montante dos elementos cilíndricos, dista 27,7 mm do eixo do pilar, ou seja, tem coordenada $X=8,972$ m. A secção do centro coincide com a coordenada $X=9,0$ m, sendo esta a coordenada de referência. A secção de jusante dista 26,3 mm do eixo do pilar, tem coordenada $X=9,026$ m. A Fig. 4.7 apresenta o esquema tridimensional da localização das secções transversais.

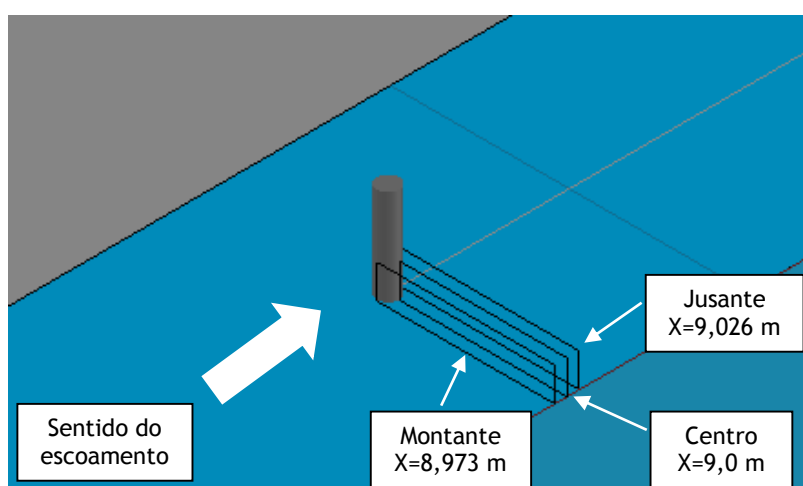


Fig. 4.7- Esquema tridimensional com a identificação das secções transversais dos ensaios realizados

Na malha de medição, devido a limitações do laser, não foi possível medir a componente vertical da velocidade instantânea nos pontos de maior proximidade do fundo do canal e da superfície livre do escoamento. Nos pontos próximos do fundo, um dos dois feixes que mediam a componente w ficava intersetado pelo fundo, como pode ser observado na Fig. 4.8. Nos pontos próximos da superfície livre, essa impossibilidade resultou do facto do meio em que cada feixe se encontrava ser diferente. Por esse motivo, nesses pontos, não foi possível criar um volume de medição nessa componente.

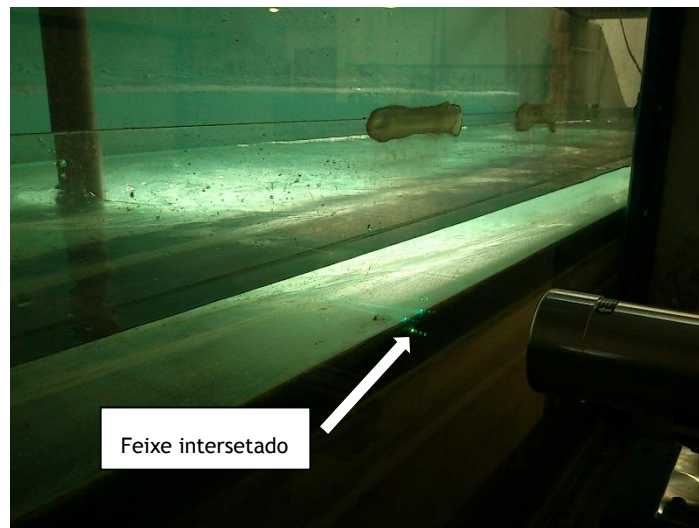


Fig. 4.8- Feixe da componente w intersetado pelo fundo do canal

A dimensão das partículas que podem ser medidas pelo LDV é limitada, inferiormente pela quantidade de luz que é dispersa por partículas muito pequenas e limitada superiormente pela natureza Gaussiana dos feixes do laser. Os limites típicos para a dimensão das partículas devem estar compreendidos os $1\ \mu\text{m}$ ou $2\ \mu\text{m}$ e $500\ \mu\text{m}$ até $1\ \text{mm}$ no limite superior. Outra característica importante que este tipo de sistema tem em consideração, é a necessidade de as partículas apresentarem uma boa capacidade refletora dos feixes emitidos pelas sondas do LDV (TSI, 2006).

A necessidade de se adicionarem partículas ao escoamento resulta do facto deste ter um número insuficiente de partículas para que as medições apresentem uma boa qualidade dos resultados (Nogueira, 2010). A adição dessas partículas tem como finalidade aumentar o número de partículas que interseam as franjas do volume de medição criado pelos feixes da sonda, e dessa forma ser registada a velocidade instantânea da mesma em cada uma das suas componentes. Com base nos valores das duas componentes da velocidade instantânea das partículas que passam no volume de medição, tem-se a velocidade de escoamento no ponto correspondente a esse volume.

De acordo com Azevedo *et al.* (2012), as partículas de óxido de alumínio mostraram-se ser as mais adequadas para o efeito. Têm um diâmetro de $10\ \mu\text{m}$, e embora com densidade diferente da água, mostram-se bastante eficazes neste tipo de medições, por proporcionarem uma melhor frequência de aquisição de dados, devido à boa capacidade refletora dos feixes emitidos

pela sonda de medição. A densidade das partículas de óxido de alumínio, cerca de quatro vezes a da água, revela-se uma desvantagem na sua utilização. Tal facto conduz a que estas se vão depositando ao longo do tempo no fundo do canal. Mas, uma vez que, a componente que as faz movimentar longitudinalmente, é muito superior à componente que induz a sua deposição, a velocidade registada na partícula é considerada a do escoamento e a estrutura deste não é destruída à medida que as partículas o acompanhavam.

Cada ensaio iniciou-se com a adição de ≈ 150 g de partículas de óxido de alumínio no reservatório de alimentação. Tratando-se de um critério subjetivo, houve necessidade de avaliar a qualidade das medições realizadas através do LDV. Para a quantidade de partículas de óxido de alumínio, adicionadas no reservatório de alimentação, ao longo das medições, foi definido um critério subjetivo para avaliação da qualidade dessas medições. Ao longo das quais, num conjunto de pontos consecutivos, onde teoricamente se esperassem boas leituras e essas, na verdade, apresentassem baixa qualidade, concluiu-se ser necessário adicionar mais partículas. A necessidade de adição de partículas resultava do facto de, no decorrer dos ensaios experimentais, algumas partículas se terem perdido no circuito do canal. Esta tarefa era realizada com o cuidado, de modo a garantir que a adição de partículas não tornaria turvo o escoamento e por esse motivo impossibilitar o progresso das medições.

No final da medição de cada uma das secções transversais, os dados das velocidades instantâneas em cada ponto foram exportados para posterior processamento.

Para harmonizar o tratamento e a interpretação dos dados recolhidos pelo LDV, com a posição geométrica no canal, foi adotado, o sistema de coordenadas apresentado na Fig. 4.9. No qual as variáveis x (vermelho), y (verde), z (azul) representam as direções longitudinal, transversal e vertical, respetivamente. A origem encontra-se na interseção da parede lateral formada por painéis de vidro com a superfície do leito do canal e a primeira secção imediatamente a seguir aos difusores.

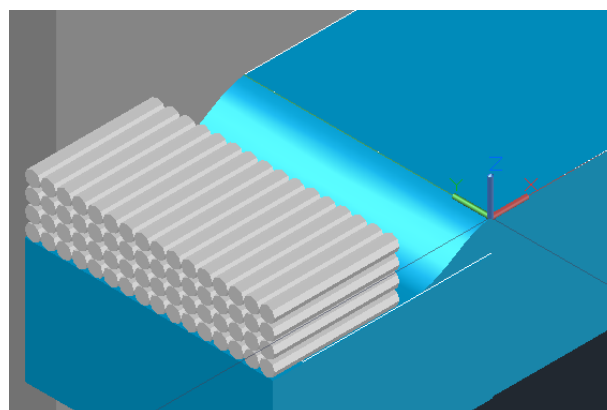


Fig. 4.9- Sistema de eixos adotado na dissertação

5 Processamento de dados

5.1 Considerações gerais

Embora a técnica de medição das componentes da velocidade instantânea do escoamento, utilizada na campanha experimental, seja uma das mais apreciadas, à semelhança das restantes que também se baseiam no princípio do efeito doppler, os dados registados necessitam de ser filtrados. Da amostra obtida fazem parte, dados correspondentes ao verdadeiro valor da componente da velocidade instantânea e respetivo sentido, mas também, ruídos que criam picos de medição, que se manifestam em velocidades incomuns. Por esse motivo, antes da análise dos dados obtidos, estes precisam de passar por um filtro que é apresentado na Secção 5.2.

Após a conclusão desse processo, os dados podem ser utilizados, com maior segurança, para definir os campos das componentes u e w das velocidades médias no tempo, e assim caracterizar-se o campo de escoamento em torno dos elementos cilíndricos.

Apresenta-se ainda neste capítulo, um processo fundamental para a determinação das tensões de Reynolds e Tensões tangenciais.

5.2 Tratamento de dados

O tratamento dos dados obtidos in-situ com o LDV, consistiu na aplicação de um filtro que removesse, em cada ponto da malha de medição, os registos das velocidades, das partículas dispersas no escoamento, muito superiores à média, conhecidos por picos. Este filtro foi aplicado nas duas componentes da velocidade instantânea importadas do programa FlowSizer™. Este método permite trabalhar com valores mais próximos dos médios e não com valores que distorcessem a realidade dos processos físicos estudados. Assim, os dados que passam no filtro constituem uma amostra que representa com precisão a velocidade do escoamento.

O filtro aplicado, aos dados recolhidos nos ensaios da campanha experimental, foi proposto por Goring & Nikora (2002) e modificado por Azevedo (2012), traduzido numa função Matlab. Este método é composto por duas etapas, em que cada uma apresenta dois passos. O primeiro passo, da primeira etapa, consiste na deteção dos picos que excedessem em 30 % a intensidade turbulenta (Azevedo, 2012). Esses registos, correspondem aos valores da velocidade instantânea que são em cerca de 30 % superiores à respetiva média, depois de detetados são eliminados. A Fig. 5.1 apresenta a aplicação da primeira etapa desse mesmo filtro à série temporal da velocidade instantânea longitudinal, u , para o ponto que se localiza na malha de montante do ensaio 1, na vertical 1 e dista 62 mm do fundo do canal. Os pontos a vermelho

representam os valores que passaram no filtro, os pontos a preto indicam os valores filtrados através da eliminação dos maiores picos que estão associados a erros de medição.

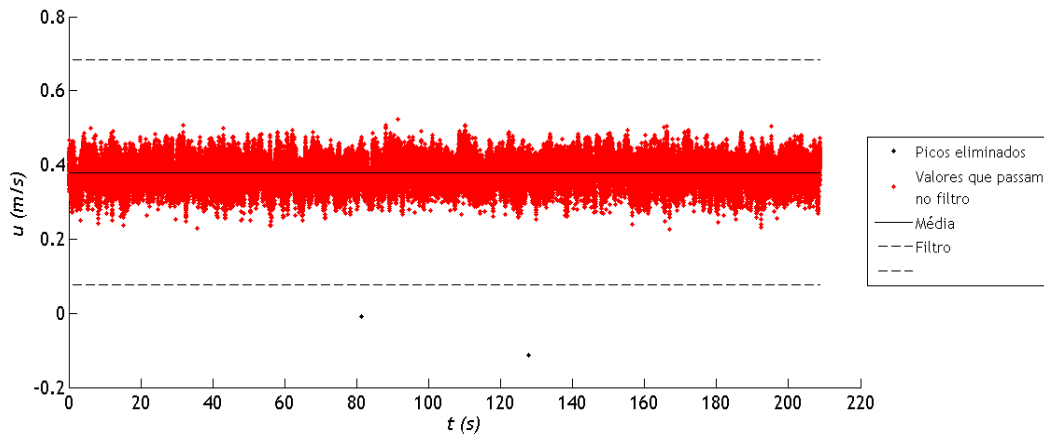


Fig. 5.1- Aplicação da primeira etapa do filtro proposto por Goring & Nikora (2002) e modificado por Azevedo (2012), na secção transversal de montante

A segunda etapa do método proposto por Goring & Nikora (2002) e também utilizado por Azevedo (2012), consiste na substituição arbitrária dos picos que passaram pela primeira etapa. Nesta fase, o filtro deteta os picos de forma aleatória e, em vez de os eliminar como acontecia na etapa anterior, reposiciona-os na amostra, usando um polinómio de 3º grau que toma como referencia os 12 registos de velocidade antes e depois desse pico. A necessidade de realizar duas etapas e não apenas uma, nomeadamente a segunda, deve-se ao facto de, caso da primeira etapa não ser realizada, os picos substituídos seriam os maiores contidos na amostra e dessa forma continuaria a haver registos muito superiores à média (Goring & Nikora, 2002). A Fig. 5.2 apresenta a aplicação da segunda etapa do filtro. Os pontos a preto identificam os picos substituídos, os pontos a vermelho identificam os registos que passaram na segunda etapa do filtro.

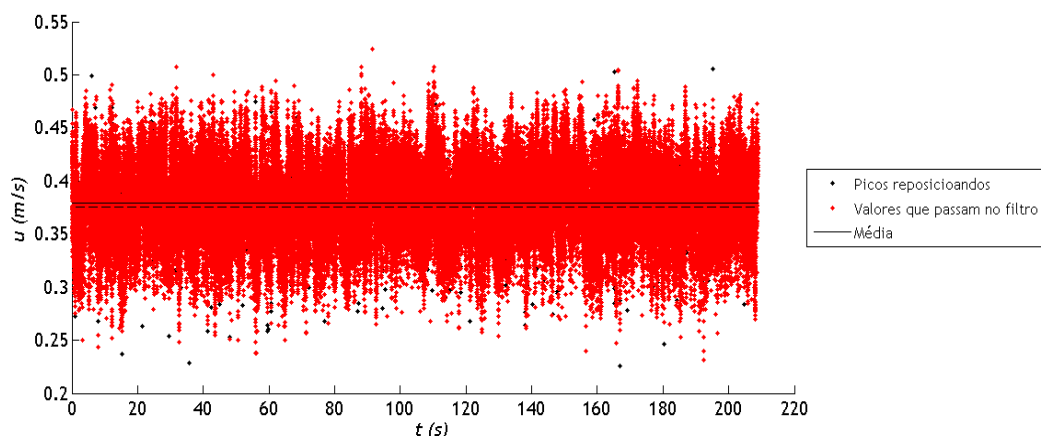


Fig. 5.2- Aplicação da segunda etapa do filtro proposto por Goring & Nikora (2002) e modificado por Azevedo (2012), na secção transversal de montante

Depois de filtrados os dados de todos os pontos da malha, os resultados foram organizados em ficheiros de dados Excel. Foram criados três ficheiros para cada secção transversal medida, um associado à componente longitudinal da velocidade, outro à componente vertical e por último

um ficheiro que reunisse a informação das duas componentes anteriores. Esses ficheiros reuniam a informação referente às coordenadas x , y e z de cada ponto, as velocidades instantâneas e o instante associado ao registo da mesma.

Para o cálculo das tensões de Reynolds, das tensões tangenciais e dos vetores da velocidade, não foi suficiente juntar simplesmente as componentes, u e w , da velocidade instantânea, mas associar, as componentes u e w registadas no mesmo instante. Este processo, apresentado na Fig. 5.3, consistiu em identificar, para cada ponto da malha de medição, as componentes u e w da velocidade instantânea que apresentavam, no seu registo, o mesmo instante. Na figura, os pontos a preto representam a velocidade instantânea u , os pontos a vermelho a velocidade instantânea w e os círculos a azul a identificação das duas anteriores que apresentavam o mesmo instante, no ponto da malha apresentado como exemplo na Fig. 5.1.

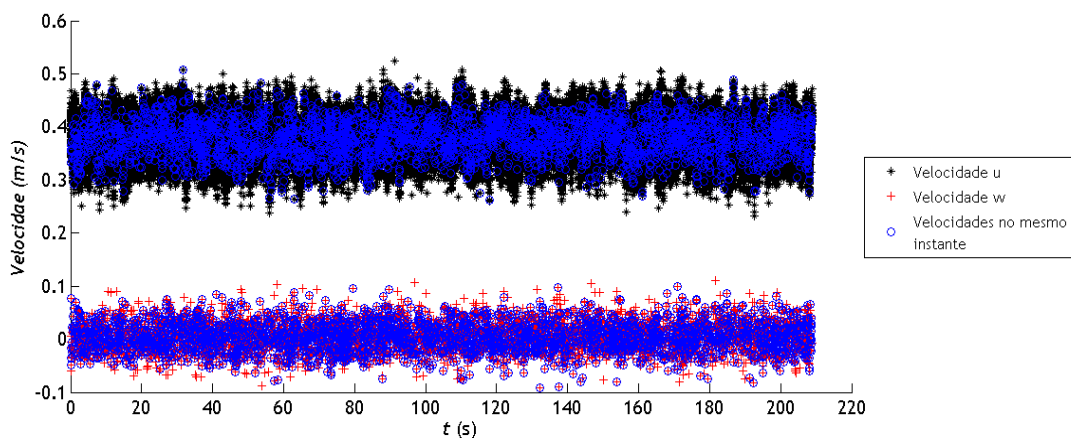


Fig. 5.3- Processo de identificação das componentes u e w registadas no mesmo instante

5.3 Integração dos dados das velocidades

A partir dos dados filtrados obtidos na fase preliminar, são definidos os campos de velocidades instantâneas, a partir dos quais são determinados os campos de velocidades médias no tempo, as intensidades turbulentas e as tensões de Reynolds nas seções medidas para cada elemento cilíndrico. Nesta fase foram criados os dados que serão os resultados obtidos desta investigação.

5.3.1 Velocidades médias

O valor médio, num ponto de medição, da componente longitudinal da velocidade instantânea do escoamento, u , é dado pela Equação (11)

$$U = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \right)^{-1} \quad (11)$$

onde u_i representa a componente longitudinal da velocidade instantânea e N o número de registos de u_i obtidos em cada ponto da malha de medição.

Como já referido anteriormente, as medições com o LDV consistem na deteção de partículas em suspensão que atravessam o volume de medição. Deste modo, constata-se que, quando a velocidade aumenta, também aumenta o número de partículas que atravessa o referido volume, por unidade de tempo, verificando-se até uma relação de proporcionalidade. Nesta situação, se apenas se calcular a média das medições realizadas, o resultado vem sobrestimado, uma vez que há mais deteções por unidade de tempo. A utilização da Equação (11), apresentada no manual do laser e proposta por McLaughlin *et al.* (1975), permite corrigir os valores da medição. A utilização de uma densidade suficientemente alta de partículas, também constitui uma solução, tornando a amostragem da medição de um ponto mais uniforme (TSI, 2006).

À componente vertical da velocidade instantânea do escoamento, w , não se aplica o processo apresentado anteriormente, porque o valor médio encontra-se muito próximo de zero, apresentando a velocidade instantânea um comportamento simétrico em torno do seu próprio valor médio. O valor médio de w , em cada ponto, é dado pela Equação (12)

$$W = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \right) \quad (12)$$

onde w_i representa a componente vertical da velocidade instantânea e N o número de registos de w_i obtidos em cada ponto da malha de medição.

5.3.2 Intensidades turbulentas e tensões de Reynolds

Com base nos valores médios das duas componentes da velocidade do escoamento calculados da forma apresentada em 5.3.1, foi possível determinar as componentes flutuantes da velocidade, u' e w' . A obtenção destas flutuações é fundamental para o cálculo das intensidades turbulentas e das tensões de Reynolds. Como apresentado em 2.2.4, utilizou-se a Equação (4) para o cálculo destas flutuações, tendo-se avaliado, ainda, os seus valores médios no tempo, em cada ponto de medição. Posteriormente, recorrendo-se à Equação (5), calculou-se a intensidade turbulenta de cada uma das componentes da velocidade de escoamento.

Para o cálculo das tensões de Reynolds, utilizou-se a Equação (8) apresentada em 2.2.5. Embora antes tenha surgido a necessidade de gerar uma correspondência entre as duas componentes medidas. Essa correspondência obedece, para cada ponto de medição, a que as duas componentes tenham sido obtidas no mesmo instante, tal como explicado em 5.2.

6 Caracterização do escoamento junto de elementos cilíndricos

6.1 Considerações gerais

No presente capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados, no Canal das Estruturas Hidráulicas, aos dois elementos cilíndricos com diferentes permeabilidades. Nesses ensaios, foram medidas as componentes u e w da velocidade instantânea do escoamento, em 3 secções transversais, e os resultados obtidos permitiram uma avaliação da influência da permeabilidade na estrutura do escoamento.

Na secção 6.2, caracteriza-se o campo de escoamento junto ao elemento cilíndrico impermeável, apresentando-se os resultados das médias temporais da componente longitudinal e vertical da velocidade, das respectivas intensidades turbulentas, das tensões de Reynolds e das tensões tangenciais. Na secção 6.3, caracterizam-se as mesmas variáveis para o elemento permeável. A finalizar o capítulo, comparam-se os resultados apresentados nas duas secções e avalia-se o efeito da permeabilidade na estrutura do escoamento.

6.2 Elemento cilíndrico impermeável

Nesta secção procede-se à caracterização do campo de escoamento junto do elemento cilíndrico impermeável, definido como o escoamento que normalmente se observa em torno dos pilares e fundações, com forma cilíndrica, de pontes. A Fig. 6.1 apresenta o esquema do respetivo ensaio e as respetivas secções estudadas.

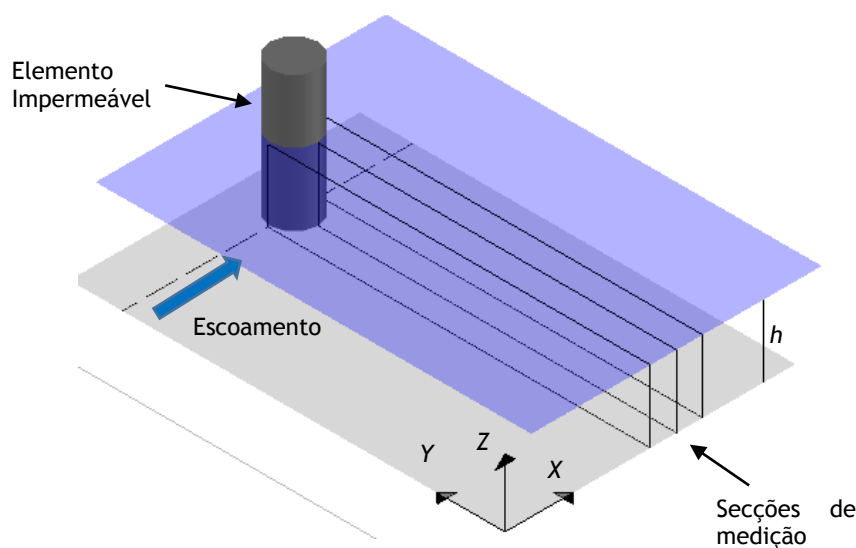


Fig. 6.1- Esquema representativo do ensaio do elemento cilíndrico impermeável

Nas secções seguintes os resultados das distribuições da velocidade e das intensidades turbulentas são apresentados em valores médios no tempo, recorrendo a isolinhas. As intensidades turbulentas encontram-se normalizadas pela velocidade de atrito junto ao fundo, U_s , calculada com os parâmetros geométricos do canal, apresentada na Tabela 1. As tensões de Reynolds e tensões tangenciais totais também se encontram normalizadas, ambas normalizadas pelo quadrado da velocidade de atrito junto ao fundo já mencionada. O eixo vertical representa a posição vertical no canal, Z , normalizada pela altura de água dos ensaios, h , coincidindo a origem do mesmo com o fundo do canal. O eixo horizontal apresenta a distância, em metros, à parede composta por painéis de vidro, coincidindo a origem com o ponto do fundo do canal mais afastado do centro do elemento cilíndrico.

6.2.1 Velocidades médias temporais

Na Fig. 6.2 está representada a distribuição transversal da componente longitudinal das velocidades médias ao longo do tempo, relativa às secções de montante, centro e jusante. Os valores encontram-se compreendidos entre -0,1 e 0,7 m/s, apresentando as cores mais quentes, velocidades mais elevadas, e as cores mais frias, velocidade mais baixas. Na figura está ainda representado, a tracejado azul, o máximo valor médio da componente u obtido em cada vertical da malha de medição. De notar que, a velocidade máxima se encontra abaixo da superfície livre do escoamento, como seria expectável. A análise do campo de velocidades médias é completada com a apresentação dos vetores velocidades do escoamento na Fig. 6.4.

A análise da Fig. 6.2 permite constatar que a componente longitudinal da velocidade do escoamento é fortemente influenciado pela presença do obstáculo impermeável. Como esperado, é observada a influência da parede lateral e do fundo do canal, na velocidade dos pontos próximos desses elementos. Comprovando-se que, o escoamento ao longo de fronteiras sólidas, apresentado por Quintela (1981), tem velocidade nula. A velocidade longitudinal média máxima do escoamento, que na ausência do obstáculo, segundo Quintela (1981), se encontraria ao centro da secção transversal retangular do canal, encontra-se agora, para a secção a montante e com um valor de 0,55 m/s, aproximadamente a meio da distância entre o elemento cilíndrico e a parede lateral do canal ($Y=0,2$ m na figura). Na origem está a contração da área de escoamento para as laterais do pilar. Juntamente com o efeito da parede e do fundo, este é um fenómeno que se mantém análogo nas três secções. Na secção de montante é possível observar a drástica redução da velocidade longitudinal na proximidade ao centro do pilar, $\approx 0,1$ m/s, mas com tendência a aumentar com o afastamento ao elemento cilíndrico. Estes 0,1 m/s registados a aproximadamente 3 mm do obstáculo, sugerem a anulação da componente longitudinal junto da parede do mesmo, corroborando com Fael (2008). Na secção do centro, é visível uma menor espessura da zona do escoamento com velocidades próximas de zero e logo junto desta uma outra zona de elevadas velocidades, próximas de 0,65 m/s. Nesta secção, a zona da fronteira do escoamento com o elemento cilíndrico apresenta um gradiente de velocidade mais abrupto que a secção de montante, corroborando com Ataie-Ashtiani & Aslani-

Kordkandi (2013). Na secção de jusante, não foi possível representar as isolinhas referentes aos dados obtidos nos pontos próximos do elemento cilíndrico, no intervalo $0,36\text{m} \leq Y \leq 0,40\text{ m}$, porque surgiu um problema nesses dados durante o seu tratamento. Mas pode observar-se, no perfil de velocidades máximas apresentado, que na zona mais próxima do pilar, foi onde se registou o valor máximo da componente longitudinal, na ordem dos $0,7\text{ m/s}$. Este comportamento é consequência da dispersão da estreita zona de elevado gradiente de velocidades, verificado na secção do meio. Nesta zona de jusante, onde não constam dados, seriam esperadas velocidades longitudinais inferiores às observadas na zona equivalente da secção de montante (Ataie-Ashtiani & Aslani-Kordkandi, 2013). Estes valores baixos da componente longitudinal são característicos da zona de esteira, uma vez que, esta é uma zona de recirculação e o escoamento tende a acelerar na periferia, tal como referido por Quintela, 1981.

Na Fig. 6.3 são apresentadas as isolinhas da componente w da velocidade do escoamento em torno do elemento cilíndrico impermeável, nos três planos transversais medidos. Os valores desta componente encontram-se compreendidos entre -90 e 60 mm/s , representando os valores negativos um escoamento descendente e os valores positivos um escoamento ascendente. O problema relativo à interseção dos feixes do laser que medem esta componente é bem visível na apresentação destas isolinhas. A perda de pontos de medição, nas fronteiras horizontais do escoamento próximo do pilar, reduziu o desenvolvimento das isolinhas da componente vertical do escoamento.

A análise da Fig. 6.3 permite verificar que, no intervalo $0,0\text{ m} \leq Y \leq 0,25\text{ m}$, a componente vertical do escoamento nas secções a montante e do centro apresentam um comportamento relativamente análogo. Neste intervalo, a componente vertical da velocidade é praticamente inexistente, culminando com o facto de não haver escoamento nessa direcção. A influência do obstáculo, que promove o aumento do escoamento vertical, embora não deixe de se fazer sentir, perde peso para o escoamento que chega de montante, que é praticamente longitudinal. Na faixa mais próxima do pilar, $0,25\text{ m} \leq Y \leq 0,40\text{ m}$, também em todas as secções, a componente vertical é muito mais elevada que no anterior intervalo, embora, na fronteira com a parede do obstáculo, na secção do centro, esta componente da velocidade se aproxime do valor nulo. Na secção de montante, o escoamento descendente com velocidades na ordem dos 80 mm/s , irá dar origem a uma elevada vorticidade quando encontrar o fundo, conhecida por vórtice em ferradura. Na secção de jusante, próximo do elemento cilíndrico, é visível o inverter do sentido descendente do escoamento que se vinha observando nas outras duas secções, através da visualização de valores positivos. Ainda a jusante, nos $2,5\text{ cm}$ coincidentes com o raio do cilindro, constata-se que o escoamento passa por uma enorme gama de valores que variam desde os -80 até aos 40 mm/s , retratando o comportamento característico da zona de esteira. As isolinhas com valores positivos, representam o escoamento ascendente, que dão origem aos vórtices de esteira, que segundo Fael (2008), transportam, em suspensão no sentido de jusante, o material do fundo erodido a montante pelo vórtice em ferradura.

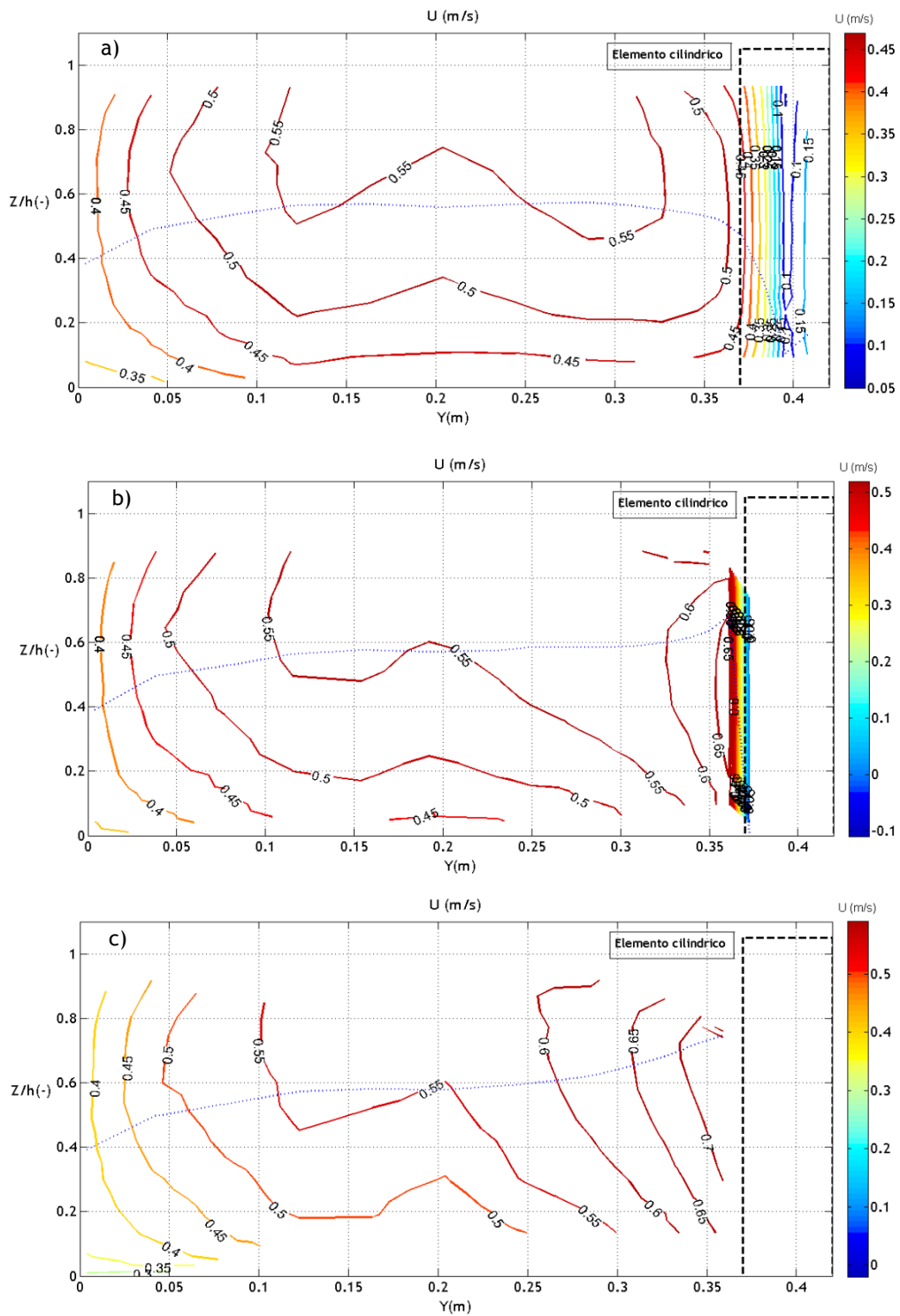


Fig. 6.2- Isolinhas da velocidade média do escoamento, componente longitudinal, U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

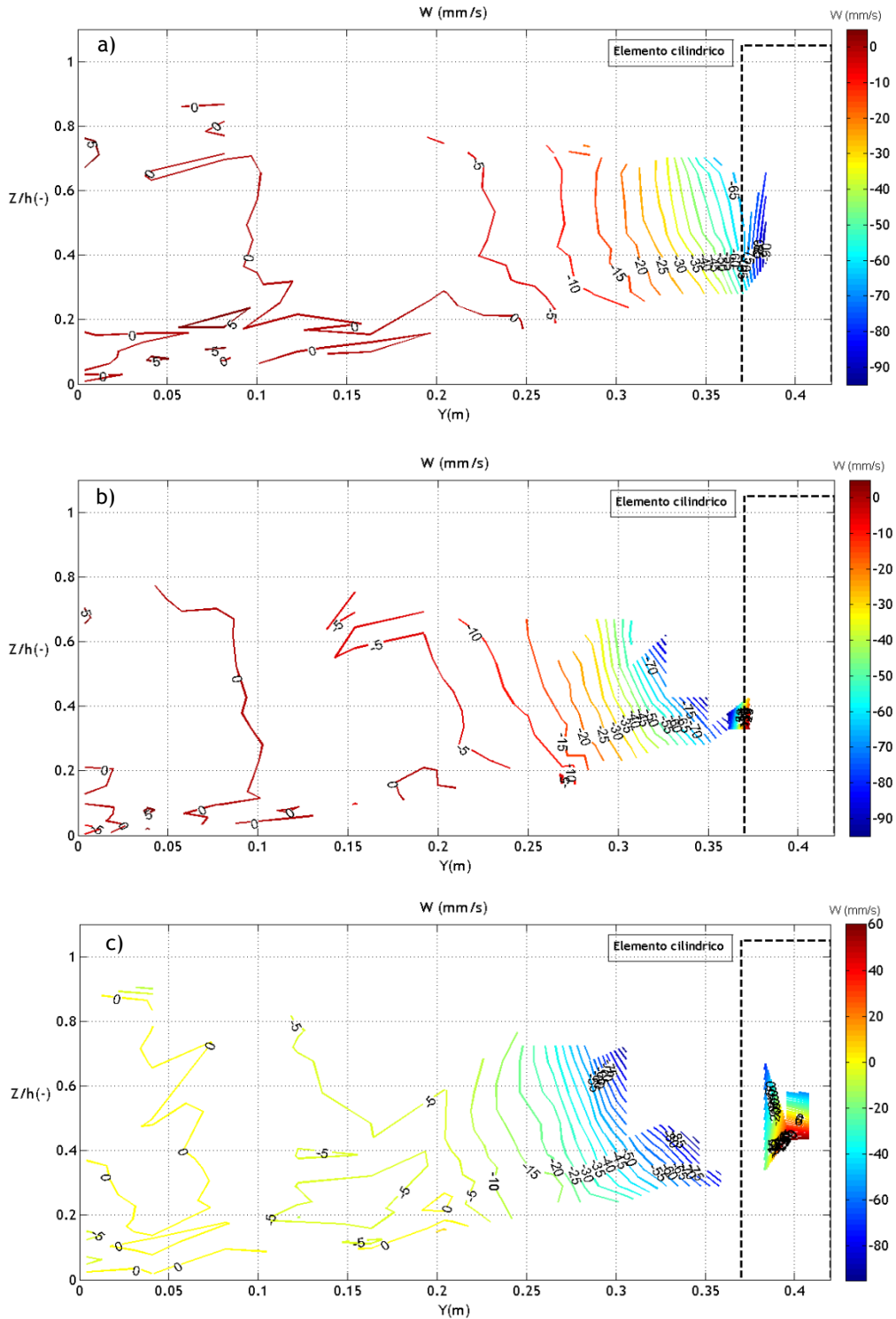


Fig. 6.3- Isolinhas da velocidade média do escoamento, componente vertical, W , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

De acordo com as Figs. 6.2 e 6.3, a componente longitudinal da velocidade do escoamento é muito superior à componente vertical. Para comprovar este facto, apresentam-se na Fig. 6.4, o campo dos vetores velocidade no plano xz , para as secções transversais medidas, determinados com as médias componentes instantâneas de u e w . Nessa figura, a magnitude e direção dos vetores velocidades é dada por $(u^2 + w^2)^{0.5}$ e $\tan^{-1}(w/u)$, respetivamente.

A análise da Fig. 6.4 permite verificar que, na zona não perturbada pela presença do elemento cilíndrico, os vetores velocidade no plano xz são horizontais. No entanto, à medida que a presença do referido elemento cilíndrico se faz sentido, o mesmo vetor começa a denotar essa presença, manifestando-se com sentido descendente, com intensidade e direção de aproximadamente $0,5 \text{ m/s}$ e $0,01 \text{ rad}$, respetivamente. Nessa zona a velocidade do escoamento é praticamente governada apenas pela componente longitudinal, por esta ser muito superior à vertical. Dado constatado na observação nos gráficos de isolinhas das componentes. Com a aproximação ao elemento cilíndrico, o escoamento na secção de montante começa a perder intensidade e a ganhar sentido desce. Essa diminuição de intensidade e aumento de sentido descendente, deve-se à diminuição da componente longitudinal, com a presença do obstáculo, em detrimento do aumento da componente vertical de sentido desce. Esse escoamento descendente irá dar origem ao vórtice em ferradura. Nas secções do meio e jusante, a componente longitudinal apresenta em todo o desenvolvimento da secção transversal uma predominância face à vertical. Nestas secções os vetores próximos do elemento cilíndrico não parecem diminuir a sua intensidade, como se observou a montante. A falta de pontos na secção de jusante não permitiu justificar o ligeiro escoamento ascendente que se esperava observar por baixo da zona de esteira Ataie-Ashtiani & Aslani-Kordkandi (2013). A intensidade do vetor velocidade diminui junto do fundo do canal.

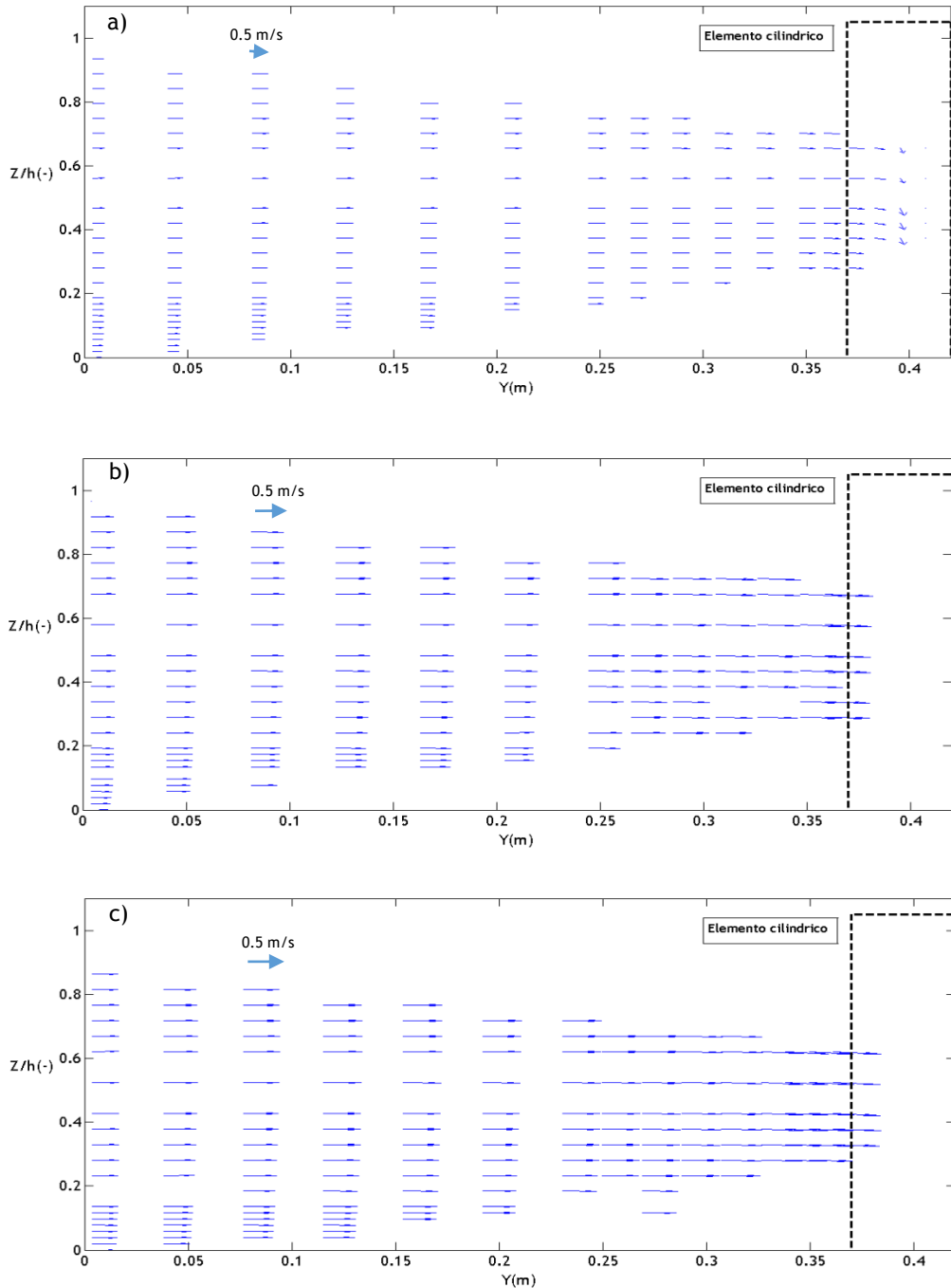


Fig. 6.4- Vetores velocidade no plano xz, nas secções transversais ao escoamento, a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

6.2.2 Intensidade turbulenta

As intensidades turbulentas relativas à componente longitudinal do escoamento nas secções transversais medidas são apresentadas na Fig. 6.5. A intensidade turbulenta U_{rms}/U^* , nas três secções, no intervalo $0,5 \leq Z/h \leq 1$, é reduzida, exceto na secção do centro onde existe uma zona muito localizada próxima da superfície e junto ao pilar. Esse efeito de maior intensidade propaga-se para jusante. A zona onde se faz verdadeiramente sentir o efeito da intensidade turbulenta, é a que está compreendida entre a meia altura de escoamento e o fundo do canal.

Na secção de montante observa-se mesmo um grande desenvolvimento dessa zona, coincidente com o espaço onde surge o vórtice em ferradura.

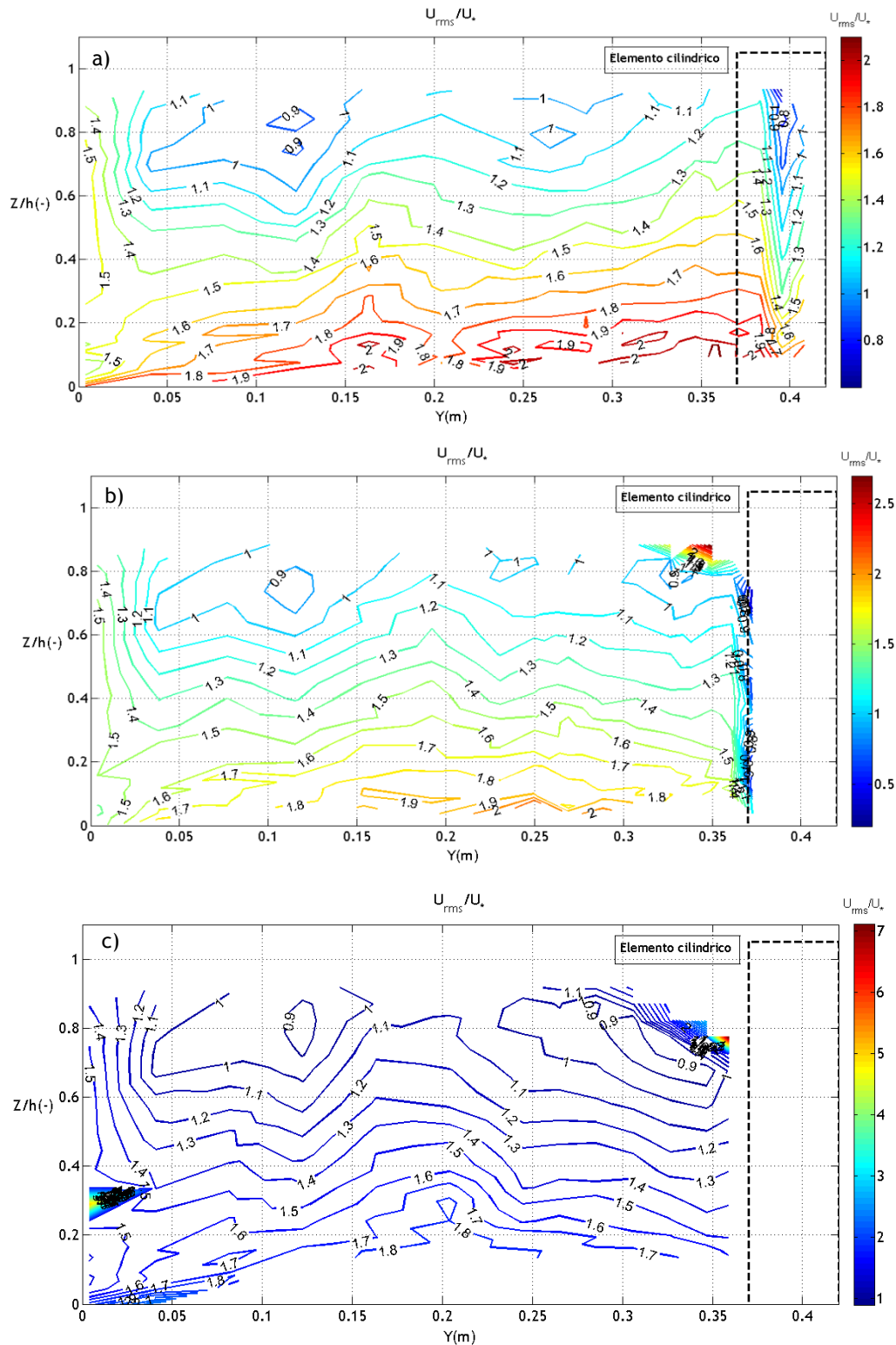


Fig. 6.5- Intensidade turbulenta U_{rms} , normalizada por U_* , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

A Fig. 6.6 apresenta a intensidade turbulenta na direção perpendicular ao fundo do canal, W_{rms}/U_* . Esta componente da intensidade turbulenta apresenta-se muito uniforme nas três secções transversais, estando em todas elas próximas da unidade. Exceto na zona da meia altura

do escoamento junto da parede do pilar, na secção do meio, onde surge uma elevada turbulência, muito localizada, que depois se propaga para jusante. A intensidade turbulenta, W_{rms} , apresenta uma amplitude de valores superior a U_{rms} , estando compreendida no intervalo $0,6 \leq W_{rms}/U \leq 20$. Numa análise geral às duas componentes da intensidade apresentadas, verifica-se que a componente longitudinal, em todas as secções, é aproximadamente 1,5 vezes superior à componente vertical, excluindo os valores mais extremos em cada componente.

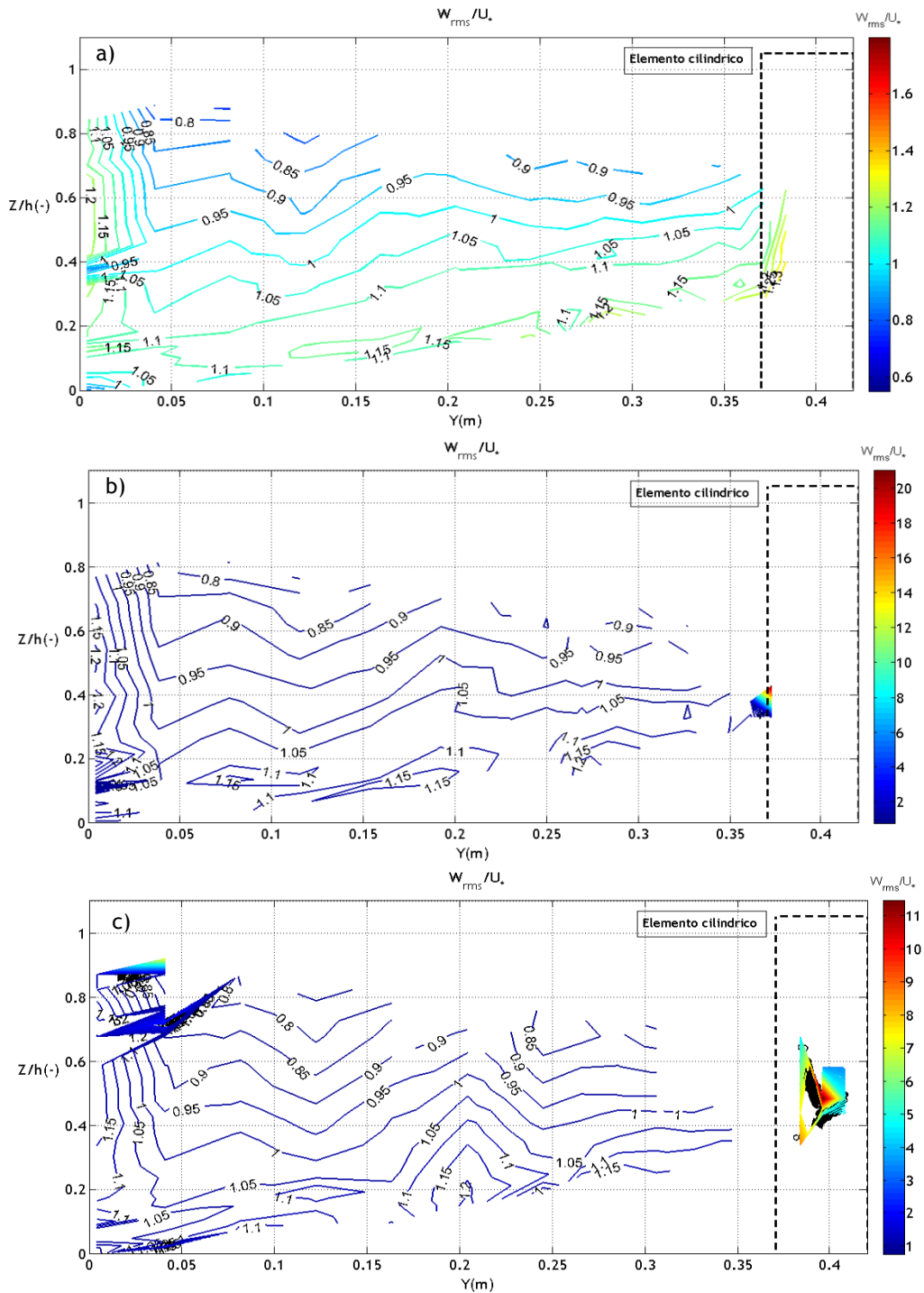


Fig. 6.6- Intensidade turbulenta W_{rms} , normalizada por U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

6.2.3 Tensões de Reynolds no plano vertical

As tensões de Reynolds verticais médias, τ_{xz} , $t_t = -\rho\overline{u'w'}$, são uma componente da tensão tangencial total, correspondendo à parcela da tensão tangencial aparente devida às flutuações turbulentas da velocidade, como foi apresentado no ponto 2.2.4. Do mesmo modo da

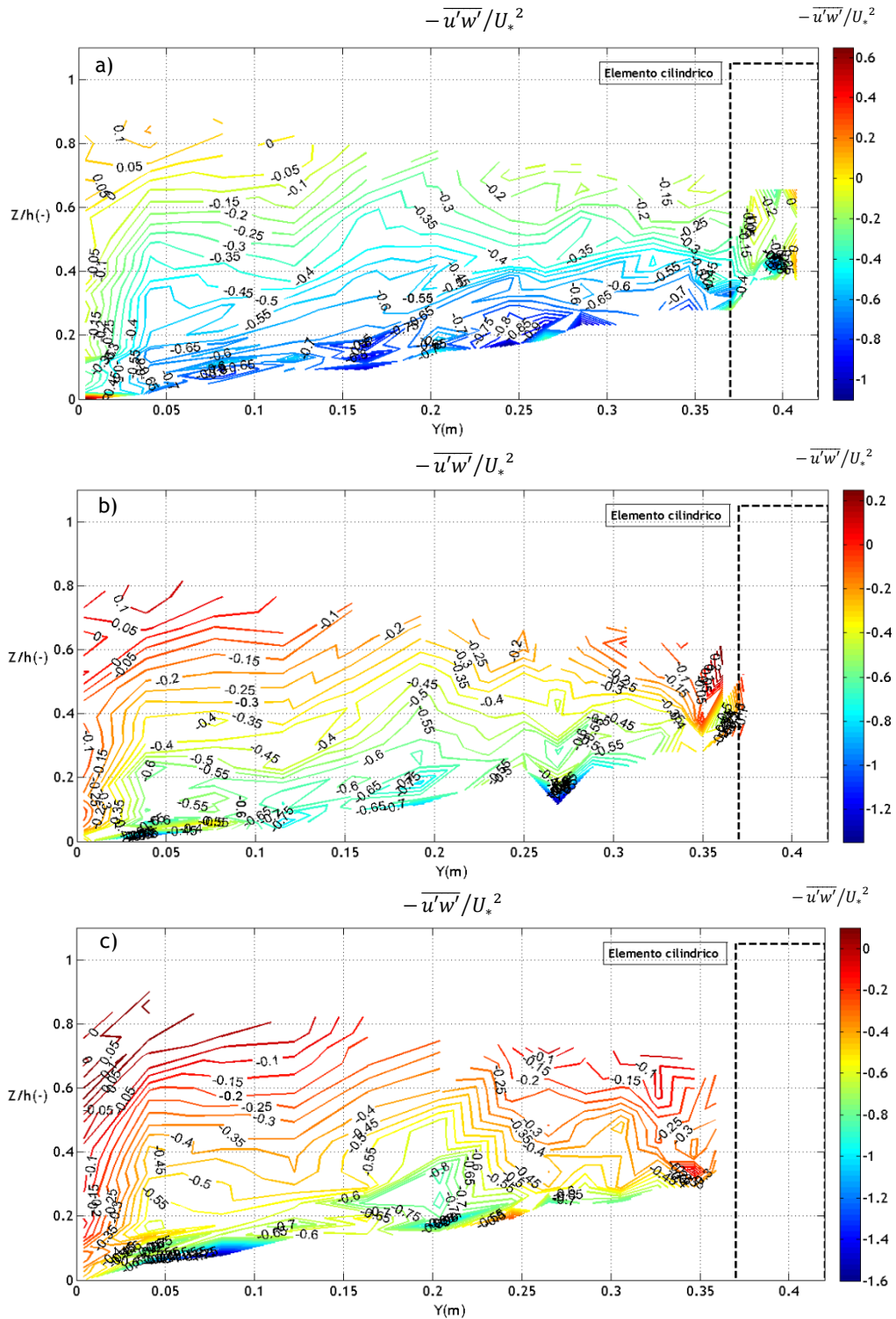


Fig. 6.7- Tensões de Reynolds no plano xz , τ_{xz} , normalizadas por ρU_*^2 , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

velocidade, os resultados da distribuição das tensões são apresentadas sob a forma de isolinhas onde as cores quentes, representam as tensões mais elevadas, e as cores frias as tensões mais baixas.

A Fig. 6.7 apresenta os contornos da tensão de Reynolds verticais, nos 3 planos de medição transversais ao escoamento. Nessa figura, os valores da tensão de Reynolds encontram-se normalizados por ρU^2 .

Dos gráficos apresentados na Fig. 6.7 verifica-se que, no intervalo $0,0 \text{ m} \leq Y \leq 0,10 \text{ m}$ das três secções, as tensões de Reynolds transitam de valores negativos para positivos. Apresentando os pontos mais próximos da superfície, os valores positivos, e os pontos mais próximos do fundo, os valores negativos. Isto pressupõe que obrigatoriamente em algum ponto dessa zona o valor da tensão de Reynolds seja nulo. Os valores negativos encontram-se na metade da altura de escoamento mais próxima do fundo do canal porque é aí que é observada maior interferência nas componentes longitudinal e vertical. Nessa zona do escoamento as flutuações turbulentas são maiores.

Já junto ao pilar, na secção de montante, os valores encontram-se mesmo muito próximos do zero, com tendência para tomarem valores positivos com a aproximação à superfície livre. Os valores próximos de zero traduzem o efeito retardador do escoamento por parte do obstáculo. Na secção de jusante, com a aproximação ao pilar, os valores de $-\overline{u'w'}/U_*^2$ começam a crescer, tal como registado por Ataie-Ashtiani & Aslani-Kordkandi (2013), embora não cheguem a apresentar os valores positivos característicos da zona do escoamento onde surgem os vórtices de esteira, por falta de dados.

6.2.4 Tensões tangenciais

Para completar a análise de tensões do campo de escoamento em torno do elemento cilíndrico impermeável, apresentam-se na Fig. 6.9 as tensões tangenciais totais do escoamento. Estas tensões também se encontram normalizadas pela velocidade de atrito da secção de escoamento.

A secção transversal que mais sofre os efeitos das tensões tangenciais é a secção de montante. Isso é constatado pela maior mancha de cores quentes que as isolinhas dessa secção apresentam, comparativamente com as outras duas. Nesta secção esse efeito é sentido na metade da altura de escoamento mais próxima do fundo do canal ($0,0 < Z/h < 0,5$). Embora as outras duas apresentem valores maiores de tensões tangenciais, estes apenas se observam em locais pontuais junto ao fundo. Próximo da superfície, nas três secções, as tensões tangenciais mantem-se relativamente constantes, variando apenas entre 0 e 0,4, em termos absolutos. Esta homogeneidade de valores, na metade superior das três secções, deve-se ao baixo efeito das forças viscosas que é característico e ao comportamento das tensões de Reynolds, que foi apresentado anteriormente como sendo também constante.

Em torno do elemento cilíndrico não se verifica grande variação no comportamento das tensões tangenciais. Possivelmente pela anulação da parcela viscosa, que é gerada na fronteira do escoamento com a parede do obstáculo pelo efeito de maior magnitude que se observou nas tensões de corte de origem turbulenta.

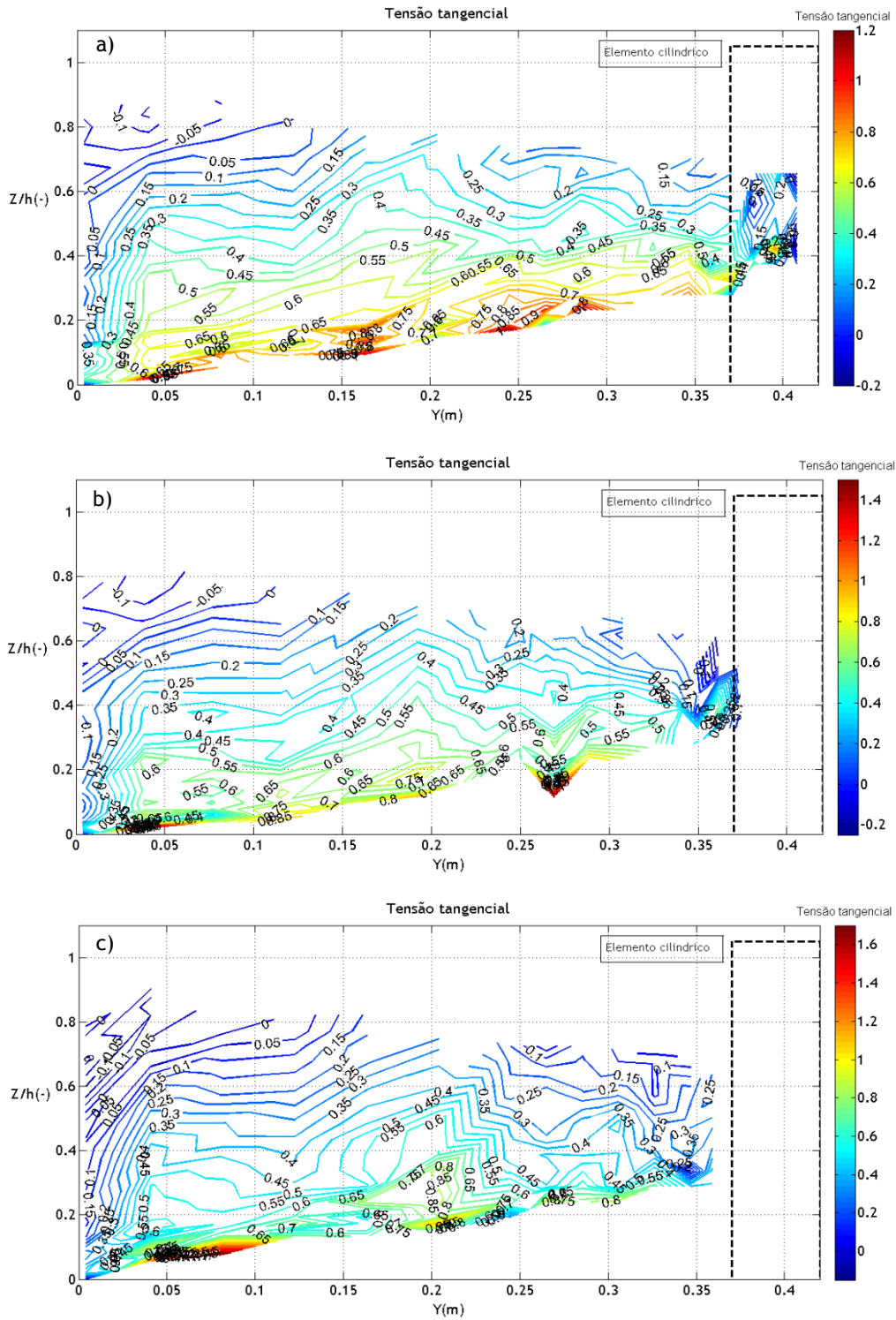


Fig. 6.8- Tensões tangenciais, normalizadas por U^2 , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

6.3 Elemento cilíndrico permeável

Nesta secção procede-se à caracterização do campo de escoamento junto do elemento cilíndrico permeável. Na Fig. 6.9 apresenta-se um esquema representativo do ensaio com a localização do pilar permeável e a localização das secções transversais de medição. Nesta caracterização constam as mesmas variáveis apresentadas anteriormente.

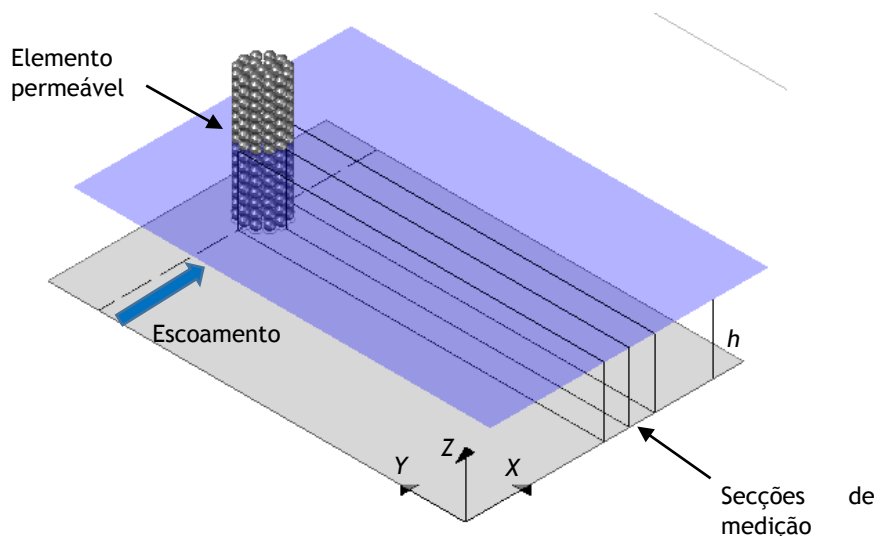


Fig. 6.9- Esquema representativo com a localização do elemento cilíndrico permeável

6.3.1 Velocidades médias temporais

Na Fig. 6.10 está representada a distribuição transversal da componente longitudinal das velocidades médias no tempo, relativa às secções de montante, centro e jusante. Os valores desta componente da velocidade estão compreendidos no intervalo $0 \leq U \leq 0,8$ m/s. Na figura está ainda representado, a tracejado azul, o máximo valor da componente u obtido em cada vertical da malha de medição associada. A análise ao campo de velocidades médias é completada com a apresentação dos vetores de velocidade do escoamento na Fig.6.10.

Fixando a parte central de cada um dos gráficos da Fig. 6.10, $Y=0,2$ m, a componente longitudinal da velocidade do escoamento ronda os 0,55 m/s, tal como no elemento cilíndrico impermeável. Correspondendo, na secção de montante, ao valor máximo observado. Também neste tipo de escoamento, a velocidade longitudinal máxima, migrou do centro da secção transversal do canal, para a parte central da Fig. 6.10 a), $Y=0,2$ m). Como seria esperado, é também observável o efeito de retardamento do escoamento provocado pela parede lateral e o fundo do canal.

Relativamente à análise das isolinhas que se encontram mais próximas do elemento cilíndrico permeável, começando pela secção de montante, constata-se que, volta a surgir uma diminuição da velocidade do escoamento de chegada ao obstáculo. Estando a menor gama de valores nos primeiros pontos de contacto entre o escoamento e a parede composta por esferas. Esses valores reduzem-se para aproximadamente metade dos verificados ao centro da secção apresentada, cerca de 0,25 m/s. Na secção do centro, na fronteira entre o escoamento e a

camada rugosa e permeável conferida pelas esferas de vidro ($Y=0,375$ m), há um ligeiro aumento da componente u , tal como foi observado na caracterização do escoamento em torno do elemento impermeável. Esse aumento de velocidade propaga-se para jusante, divergindo de $Y=0,375$ m em direção à parede. Também os valores da componente u , junto ao pilar na secção de jusante, $Y \approx 0,4$ m, diminuem até serem menores que os observados a montante. O valor máximo de U observado na secção de jusante, onde $Y \approx 0,38$ m, é de ≈ 1 m/s.

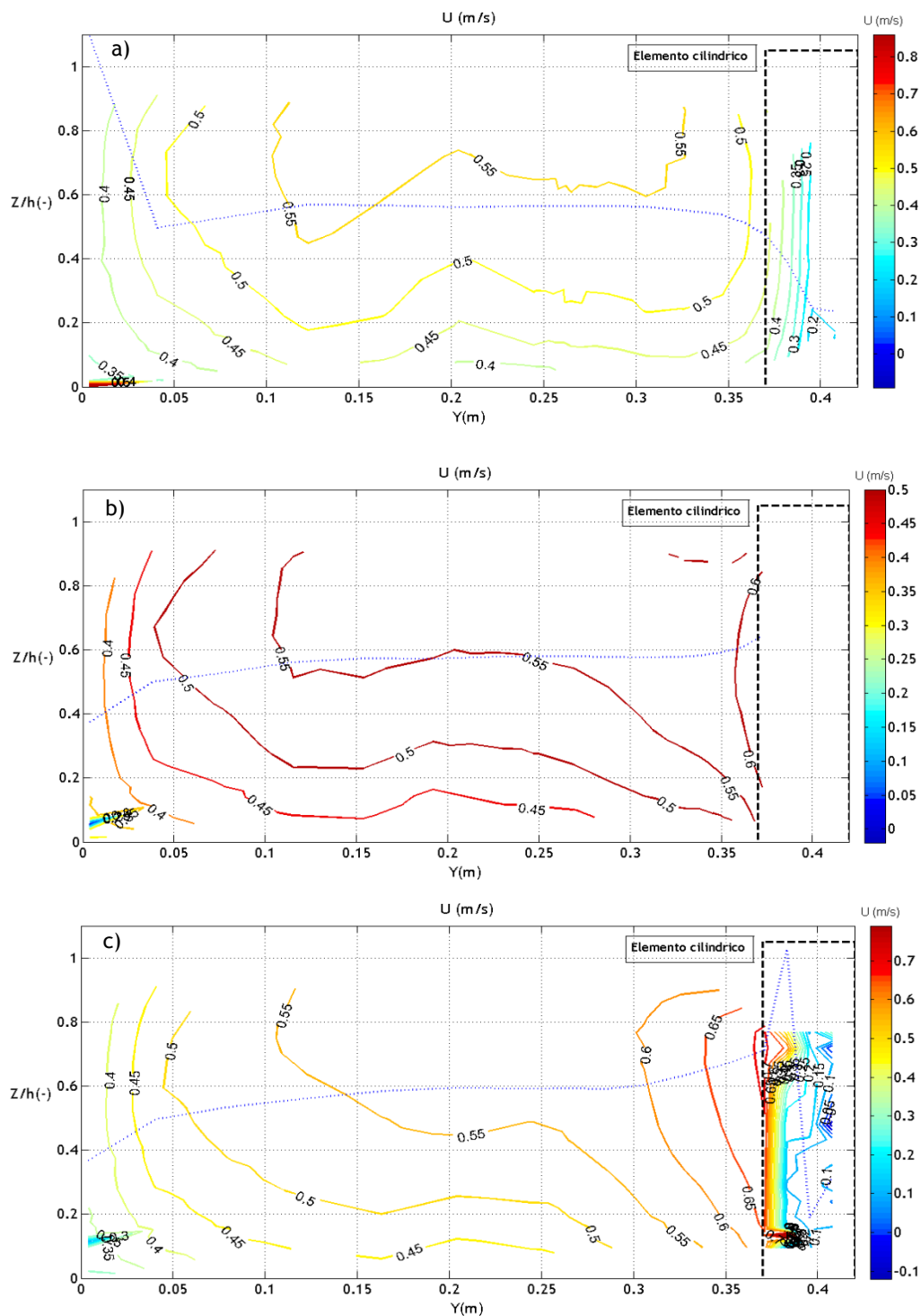


Fig. 6.10- Isolinas da velocidade média do escoamento, componente longitudinal, U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

A Fig. 6.11 apresenta os contornos da componente w da velocidade do escoamento na secções de medição do elemento cilíndrico permeável.

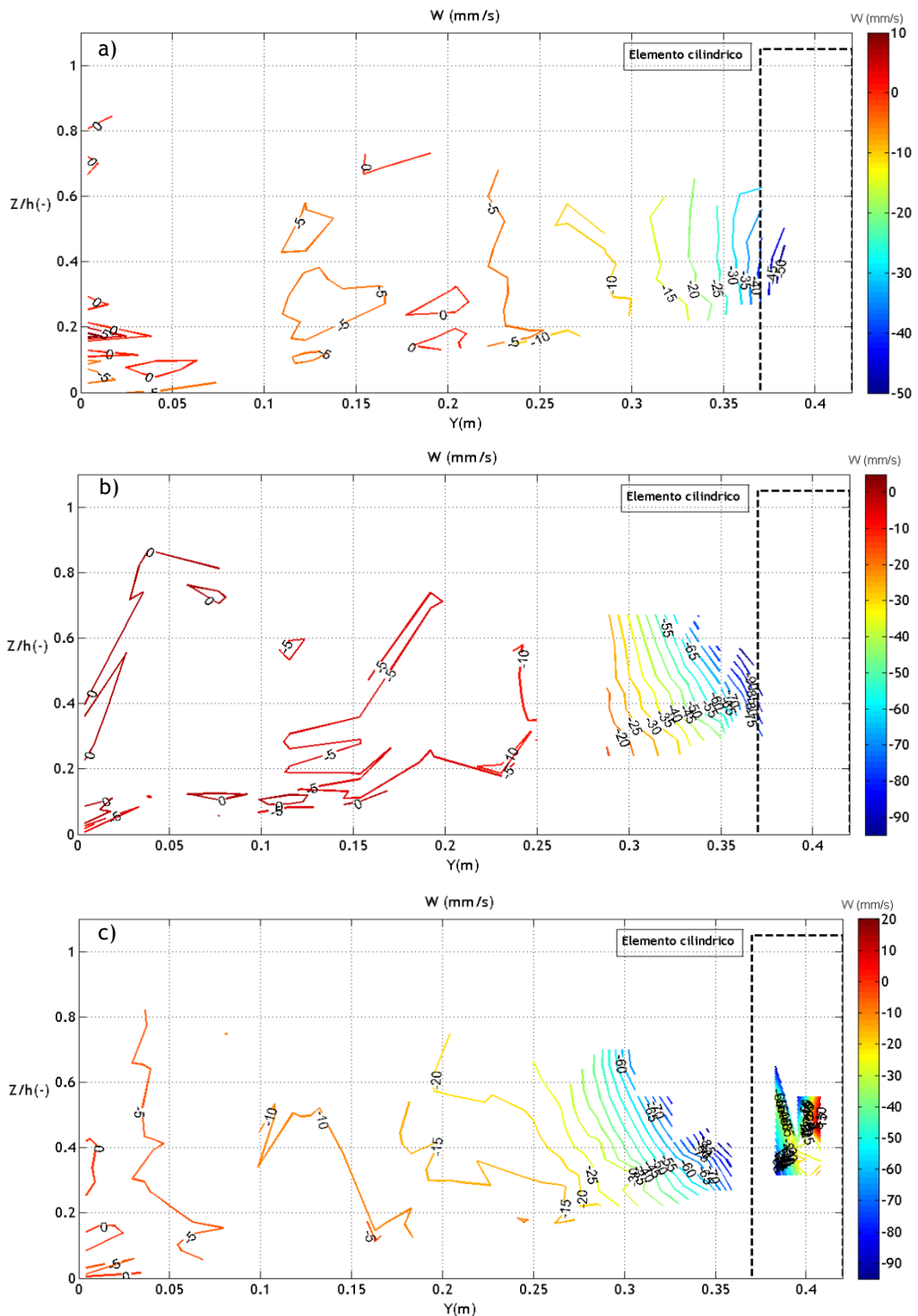


Fig. 6.11- Isolinas da velocidade média do escoamento, componente vertical, W , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

Nas três secções transversais é observado o aumento significativo do escoamento no sentido descendente, desde a janela até ao obstáculo, constatado pelos valores mais negativos apresentados na proximidade do obstáculo, fenómeno também observado por Manes *et al.*

(2009). Esta componente da velocidade, varia no intervalo $-90 \leq W \leq 20$ mm/s, constatando-se a existência de um escoamento ascendente, visível nos valores positivos das isolinhas. Ao analisá-las mais em pormenor, próximas ao elemento cilíndrico ($0,2 \leq Y \leq 0,4$ m) e comparando a barra de cores associada a cada secção, conclui-se que o sentido descendente é mais intenso nas secções do centro e de jusante, comparativamente com montante. Embora, não em quantidade, uma vez que, o intervalo transversal $0,2 \leq Y \leq 0,4$ m com isolinhas de valor negativo, é maior a montante. Essa intensidade, encontra-se associada à enorme amplitude e gradiente de valores que se observam. Na secção de jusante, o escoamento chega mesmo a apresentar um ligeiro sentido ascendente, observável nos valores positivos obtidos.

Para completar a análise ao campo de velocidades do escoamento junto do elemento cilíndrico permeável, apresenta-se na Fig. 6.12, tal como se procedeu para o obstáculo impermeável, o respetivo campo de vetores velocidade no plano xz .

O efeito retardador da velocidade do escoamento, pelo obstáculo permeável, não é tão visível como no impermeável. Como a superfície de interferência é menor devido à existência dos poros, o sentido longitudinal mantém-se para o interior da estrutura, não havendo tanto a necessidade de a contornar, embora isso também aconteça. Na secção do meio, junto ao elemento permeável, a direção do vetor velocidade é mais descendentes que no impermeável. Mas é a jusante que se observam as verdadeiras diferenças. Aí, a intensidade dos vetores da velocidade são muito inferiores às que se vinham a observar, desde $Y= 0$ m até $Y= 0,37$ m, a partir do qual, o sentido desce é bem visível. O efeito retardador produzido do contacto entre as esferas de vidro e o escoamento interno, faz-se sentir na velocidade longitudinal a jusante. Segundo Lu *et al.* (2009) em Lu *et al.* (2011), o fluxo descendente e de baixa intensidade observado, pode promover a deposição de sedimentos num escoamento de carga de sedimentos.

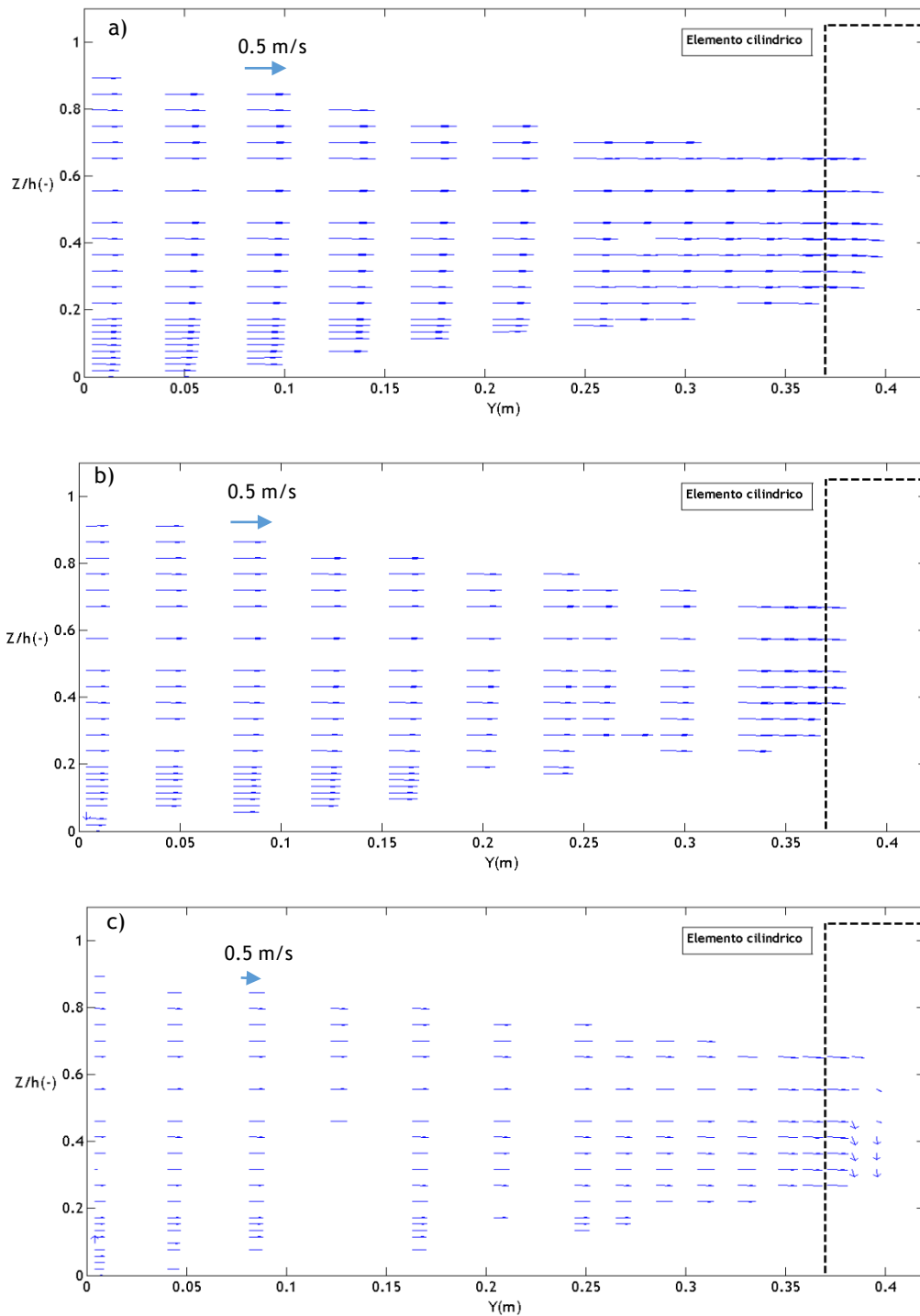


Fig. 6.12- Vetores velocidade no plano xz, nas secções transversais ao escoamento, a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

6.3.2 Intensidades turbulentas

A Fig. 6.13 pretende representar os contornos da intensidade turbulenta da componente u , devido às flutuações da velocidade longitudinal em torno do respetivo valor médio.

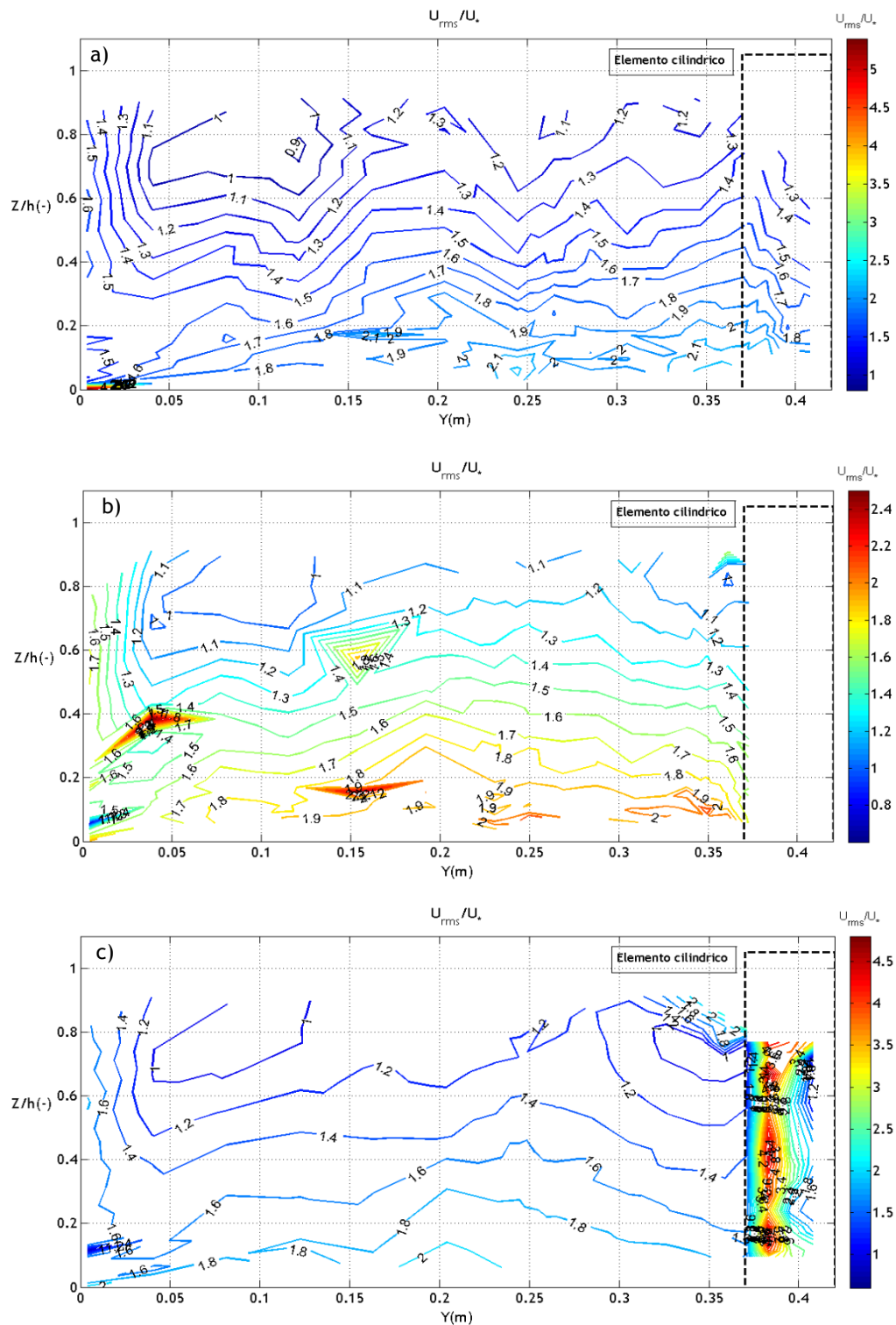


Fig. 6.13- Intensidade turbulenta U_{rms} , normalizada por U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

Da análise dos gráficos da figura anterior retirou-se que, a intensidade turbulenta do escoamento não apresenta uma grande variedade na sua gama de valores. Excetua-se alguns pontos observados no seio do escoamento, mas que estão afastados do pilar permeável. Na área de escoamento fora dos limites do obstáculo, é observado uma diminuição da intensidade turbulenta com a altura de escoamento. Ou seja, a flutuação da velocidade longitudinal diminui

com a aproximação à superfície livre. Próximo do elemento cilíndrico, as intensidades turbulentas mantem-se relativamente constantes nas secções de montante e centro, havendo um aumento a jusante.

A Fig. 6.15 traduz nas isolinhas apresentadas os valores calculados da intensidade turbulenta na direção perpendicular ao fundo do canal.

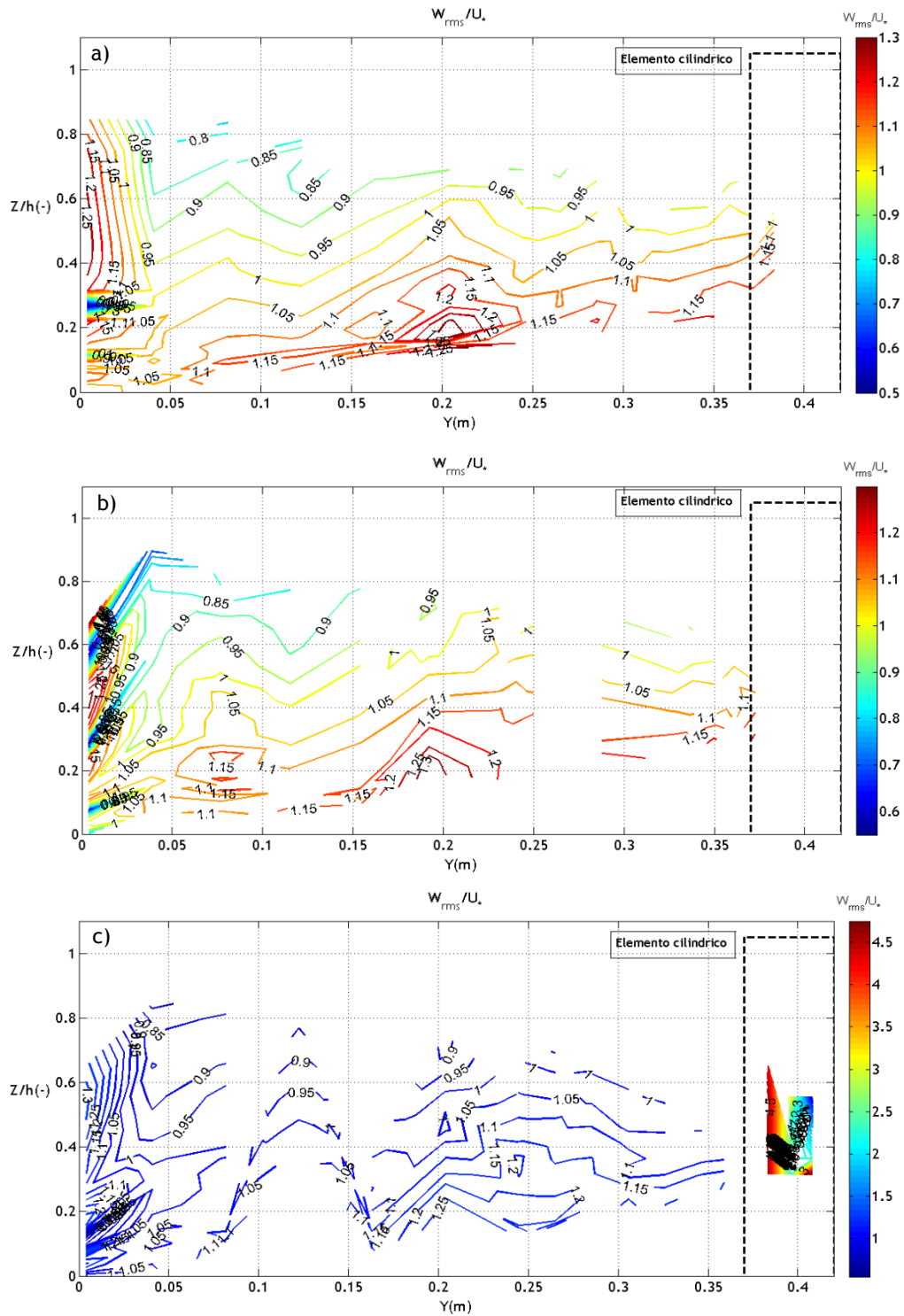


Fig. 6.14- Intensidade turbulenta W_{rms} , normalizada por U_s , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

A intensidade turbulenta da componente w , na secção a montante do obstáculo, apresenta uma baixa variação de valores, estando estes apenas compreendidos entre 0,0 e 1,6. As restantes duas secções mantêm o padrão uniforme iniciado na secção de montante, exceto na zona mais próxima do elemento cilíndrico. Aí, a intensidade turbulenta é maior, comparativamente com o observado ao longo das secções. Estes valores justificam-se com a elevada flutuação de velocidades da componente w . A jusante, coincidente com a esteira turbulenta, devido ao escoamento retardado que vem do interior do elemento cilíndrico, a componente vertical ganha influência no vetor da velocidade, embora com um comportamento bastante aleatório. Estes valores, que se encontram na ordem dos 2,5 a 4,5 na secção de jusante, são característicos de um escoamento mais desorganizado que a montante, no qual o movimento instantâneo apresenta grandes variações do movimento médio.

6.3.3 Tensões de Reynolds no plano vertical

A Fig. 6.16 representa os contornos da tensão de Reynolds verticais médias, τ_{xz} , devido à turbulência provocada pelo elemento permeável que se encontra no seio do escoamento.

Os gráficos apresentados na Fig. 6.16, um pouco à semelhança do que foi observado na Fig. 6.7 da caracterização do escoamento junto do obstáculo impermeável, descrevem um padrão ascendente, ao longo do qual os valores variam no intervalo $-2,5 \leq \overline{u'w'}/U_*^2 \leq 0,05$, desde o fundo do canal até à superfície livre, respetivamente.

As tensões de Reynolds junto do elemento cilíndrico apresentam um elevado gradiente de valores, visível nas diversas cores que as isolinhas apresentam e no reduzido espaço que existe entre elas. O intervalo $0,37 \text{ m} \leq Y \leq 0,40$, da secção de jusante, é onde é observado o maior gradiente de tensões de Reynolds, vindo em concordância com as elevadas intensidades turbulentas das duas componentes u e w criadas pela flutuações turbulentas da velocidade do escoamento, que se encontra influenciada pela permeabilidade da estrutura. O comportamento das tensões de Reynolds, na secção de jusante, difere do comportamento expectável para o Ensaio 1, na medida que, no Ensaio 2, os valores variam no intervalo $-2,5 \leq -\overline{u'w'}/U_*^2 \leq 0,5$.

6.3.4 Tensões tangenciais

A caracterização do escoamento envolvente ao elemento cilíndrico permeável termina com a apresentação dos contornos das tensões tangenciais na Fig. 6.16.

A gama de valores das tensões tangenciais, normalizadas por U_*^2 , encontra-se compreendida, nas três secções de medição, entre os -0,5 e os 3,5. Sendo na secção de jusante que se registaram os dois extremos apresentados, concretamente no intervalo $37 \text{ m} \leq Y \leq 0,40$.

As secções de montante e do centro apresentam um padrão de tensões tangenciais constante. As tensões tangenciais próximas do fundo do canal e do elemento cilíndrico são superiores às verificadas na metade superior do escoamento e junto à parede lateral. Apresentando esta

última região valores próximos de zero, como seria esperado na superfície livre de um escoamento turbulento, corroborando com Cardoso (1998). No intervalo $0,5 \text{ m} \leq Z/h \leq 1$ a jusante, existe um elevado valor de tensão tangencial, na ordem dos 3,0, em termos adimensionais, contrariando o padrão que se vinha a observar.

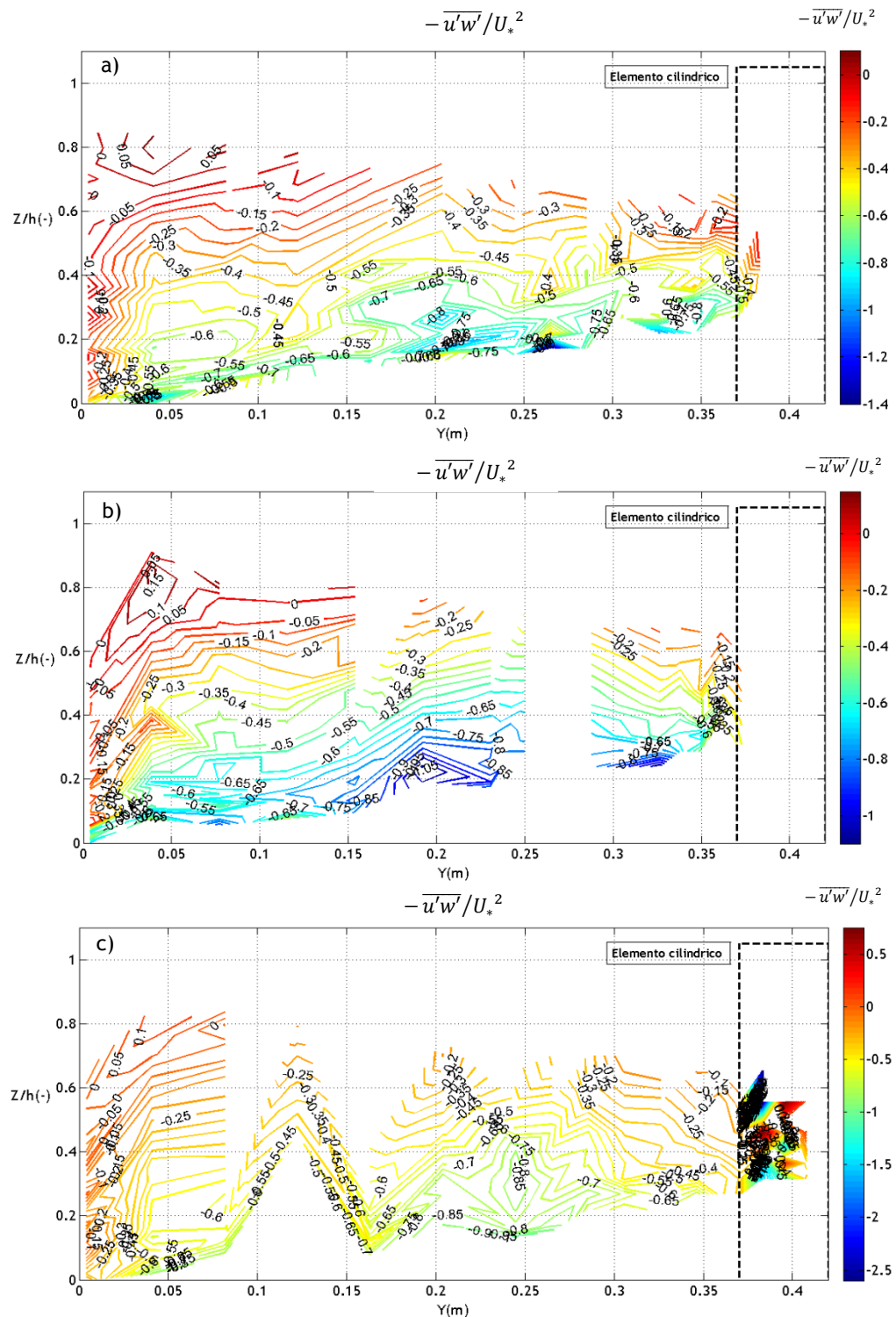


Fig. 6.15- Tensões de Reynolds no plano xz , τ_{xz} , normalizadas por ρU_*^2 , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

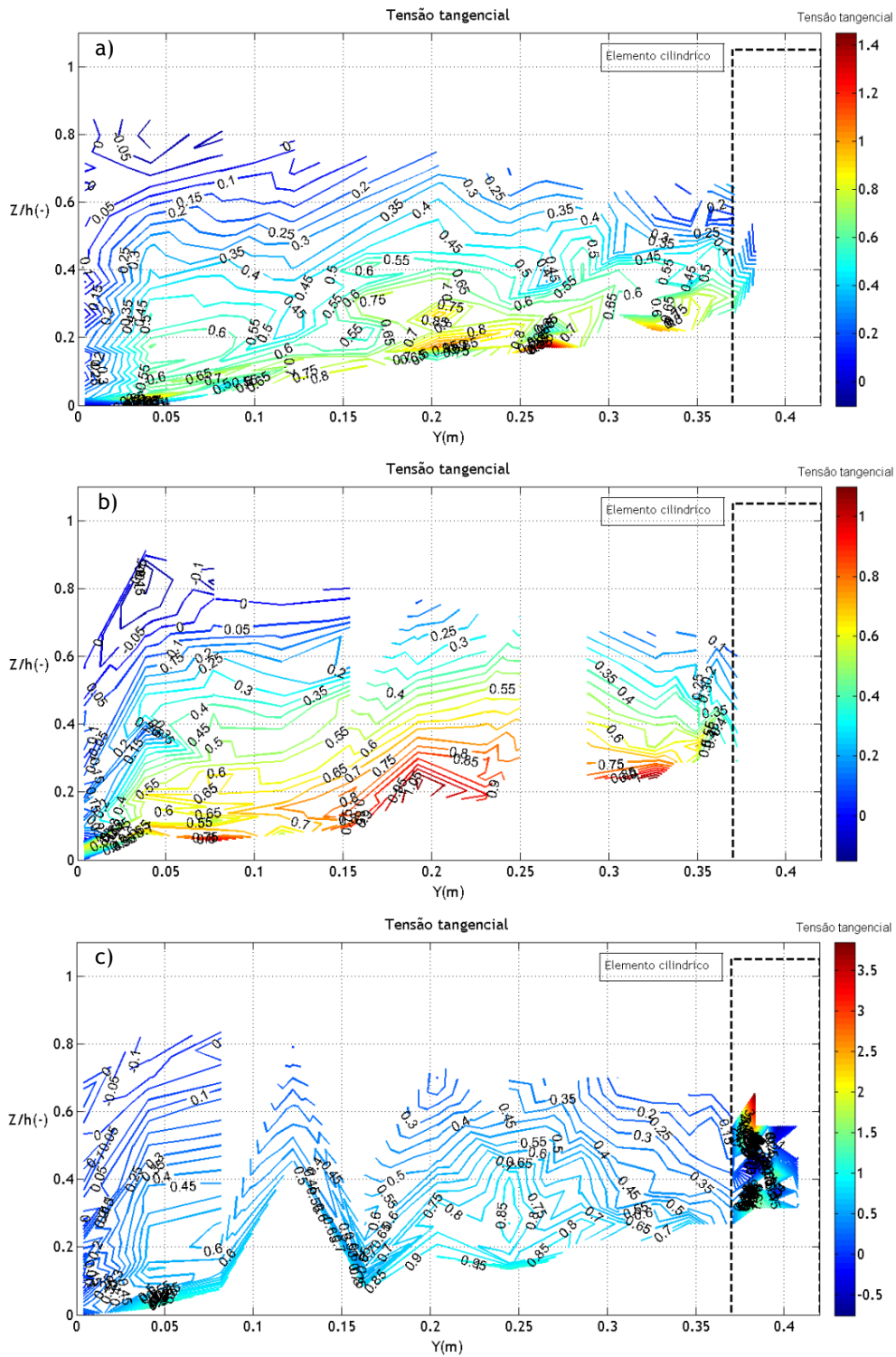


Fig. 6.16- Tensões tangenciais, normalizadas por U^2 , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

6.4 Influência da permeabilidade do elemento cilíndrico

6.4.1 Considerações gerais

Depois de nas duas secções anteriores se ter caracterizado, de forma isolada, o escoamento em torno dos dois elementos cilíndricos com diferentes permeabilidades, ou seja, a simples interpretação dos resultados obtidos em laboratório. Passa-se agora, à análise do efeito da permeabilidade de uma estrutura cilíndrica inserida no seio do escoamento, através da comparação de alguns resultados apresentados anteriormente.

A análise da influência da permeabilidade será feita através da apresentação dos perfis verticais de velocidades médias, intensidades turbulentas e tensões de Reynolds, obtidos em cada um dos ensaios.

Na Fig. 6.17 apresenta-se a interação entre os pilares e o escoamento observados na realização dos ensaios experimentais, de modo a completar a informação já apresentada.

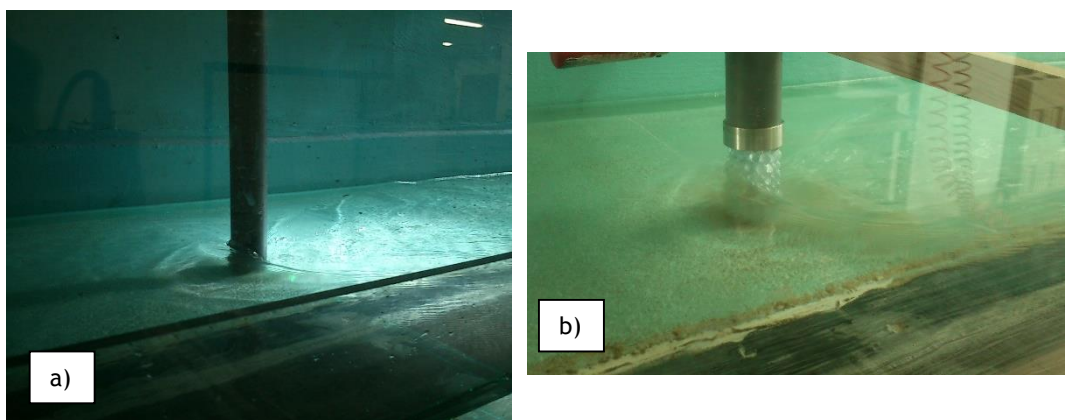


Fig. 6.17- Escoamento junto de estruturas cilíndricas, a) impermeável; b) porosa

6.4.2 Perfis de velocidades

Apresentam-se seguidamente os perfis verticais de velocidades médias temporais, das componentes u e w , em várias verticais da malha de medição. As verticais apresentadas no desenvolvimento desta subsecção são as consideradas como relevantes para análise do escoamento, de uma forma geral, e da permeabilidade, em particular. Com as verticais V1 e V4, pretende-se comparar o escoamento nas zonas próximas da parede lateral, a V10 o escoamento ao centro da malha de medição e as V14 e V16 o escoamento que envolve cada elemento cilíndrico.

Na Fig. 6.18 apresenta-se a distribuição vertical da velocidade média na direção longitudinal. A sequência de apresentação é a mesma que vem sendo seguida desde o início deste capítulo, primeiro os resultados relativos à secção transversal de montante, depois centro e por fim, jusante.

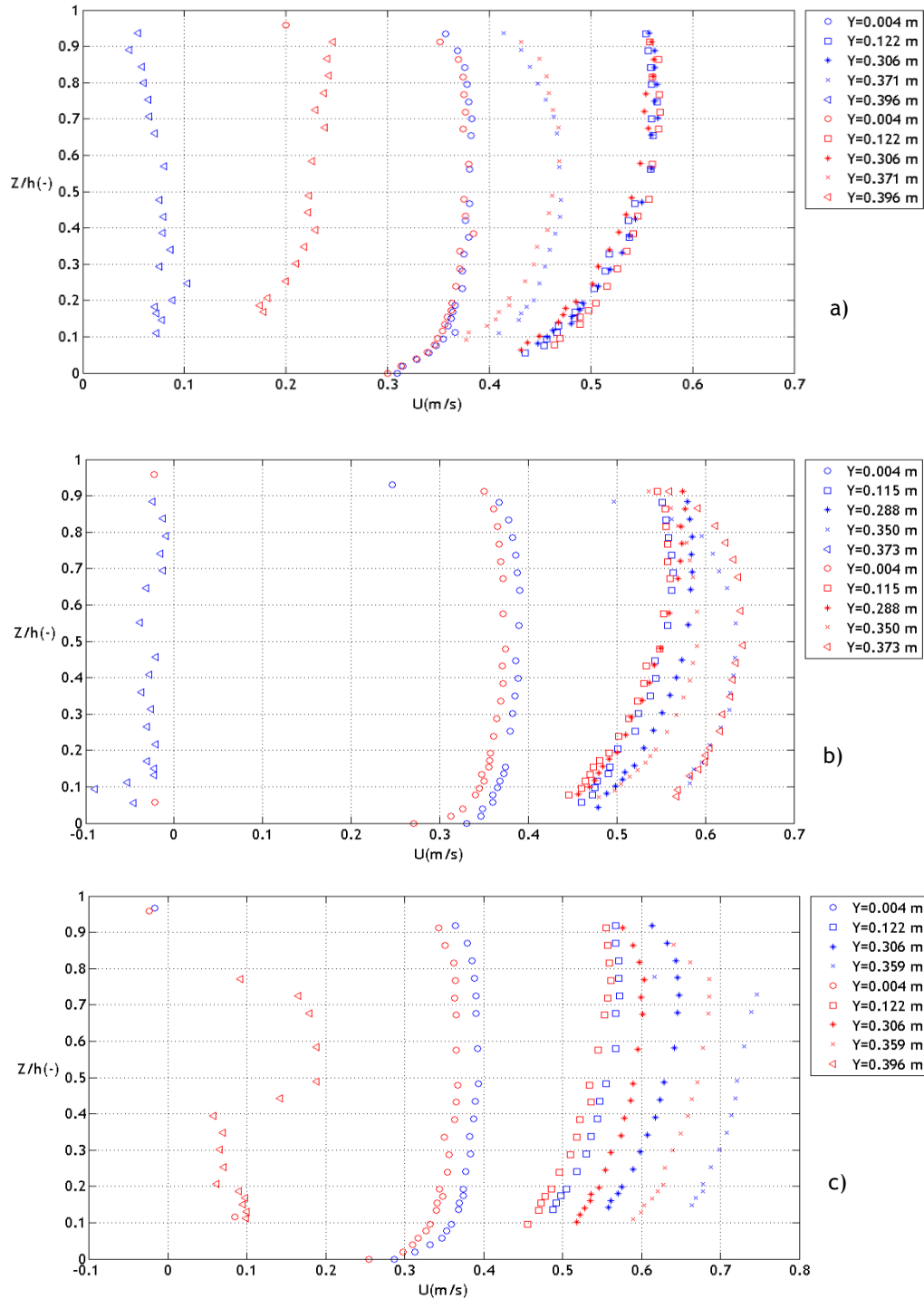


Fig. 6.18- Distribuição vertical da velocidade média do escoamento, componente longitudinal, U , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

Na secção de montante, os perfis verticais da componente longitudinal da velocidade, mais afastados dos elementos cilíndricos, nomeadamente os perfis V1, V4, V10 e V14, apresentam a forma característica da lei logarítmica que traduz o comportamento da componente u da velocidade de um escoamento 2D totalmente desenvolvido. Nos perfis de velocidade já enunciados, observa-se um aumento da velocidade de V1 para V4, mantendo-se relativamente constante até V10, mas que por influência do obstáculo volta a diminuir. Para ambos os pilares, os perfis de velocidades das verticais V16, deixam de apresentar um comportamento

logarítmico e apresentam um valor constante ao longo de toda a altura de escoamento. Constatase que, os valores da componente u do perfil de velocidades associado ao elemento com permeabilidade são superiores aos valores do elemento impermeável. Retira-se que o efeito retardador do escoamento é superior no obstáculo impermeável, uma vez que, a possibilidade do escoamento passar pelos vazios da estrutura permeável não interfere tanto com a componente longitudinal.

Ao centro, os perfis afastados dos obstáculos continuam apresentar o comportamento que tinham a montante e prolongam-no para jusante. As verticais V1, mantêm os valores no intervalo 0,3 e 0,4 m/s, e as verticais V4 e V10, entre 0,4 e 0,6 m/s. Já nas verticais V14, ao contrário do que se observou a montante, os efeitos dos obstáculos, tanto no permeável como no impermeável, aumentam os valores das mesmas. Este fenómeno propaga-se para jusante, sendo superior no elemento impermeável. Na vertical mais próxima de cada elemento cilíndrico, o comportamento é bastante distinto. Enquanto que, no pilar impermeável, a velocidade é praticamente nula em toda a altura de água, no pilar permeável, a componente u toma mesmo os valores máximos da secção do centro.

Na Fig. 6.18 c) não se apresentam os valores da componente longitudinal da vertical coincidente com o eixo do elemento impermeável, devido aos problemas já referidos anteriormente. Mas analisando o perfil vertical do pilar permeável, constata-se que há uma redução abrupta da velocidade, de 0,6 m/s observados na secção do meio para os 0,1 a 0,2 m/s registados a jusante.

Para completar a análise das componentes da velocidade do escoamento em torno dos elementos cilíndricos, apresentam-se na Fig. 6.19 os vários perfis verticais da componente w do vetor da velocidade.

A componente w , nas duas verticais mais afastadas dos elementos cilíndricos, apresenta em todas as secções transversais um comportamento próximo, não se verificando nessa zona do escoamento um movimento significativo perpendicular ao fundo do canal ($W=0,0$ mm/s). Aqui, a presença dos elementos cilíndricos no seio do escoamento não se faz sentir, continuando o escoamento a apresentar o comportamento sem interferências.

A presença dos elementos cilíndricos começa a fazer-se sentir a partir da vertical V10, zona em que na secção de montante, o escoamento começa a tomar um sentido mais descendente. No escoamento em torno do elemento impermeável essa quantidade é maior, a averiguar pela maior intensidade da velocidade. A rugosidade da fronteira do escoamento com o elemento permeável, conferida pelas esferas, poderá ser o motivo pela qual a componente vertical da velocidade, nesta vertical, seja inferior à do elemento impermeável. Como esperado, e segundo diversos autores, a componente vertical do escoamento ganha peso com a aproximação aos obstáculos.

No que diz respeito à secção transversal do centro, o escoamento descendente continua a fazer-se sentir nas proximidades dos elementos cilíndricos, embora agora com maior intensidade,

mas não havendo distinção quanto ao efeito da permeabilidade. A jusante, sensivelmente a meio da profundidade do escoamento, o escoamento em torno do pilar começa a alternar entre os sentidos descendente e ascendente, característico de uma zona com muita irregularidade como é a zona de esteira. Já o elemento permeável, não proporciona tanta irregularidade no sentido desta componente do vetor da velocidade, uma vez que o escoamento vem com menor velocidade do interior da estrutura porosa e ao ficar livre dela, tende a descer com uma menor velocidade.

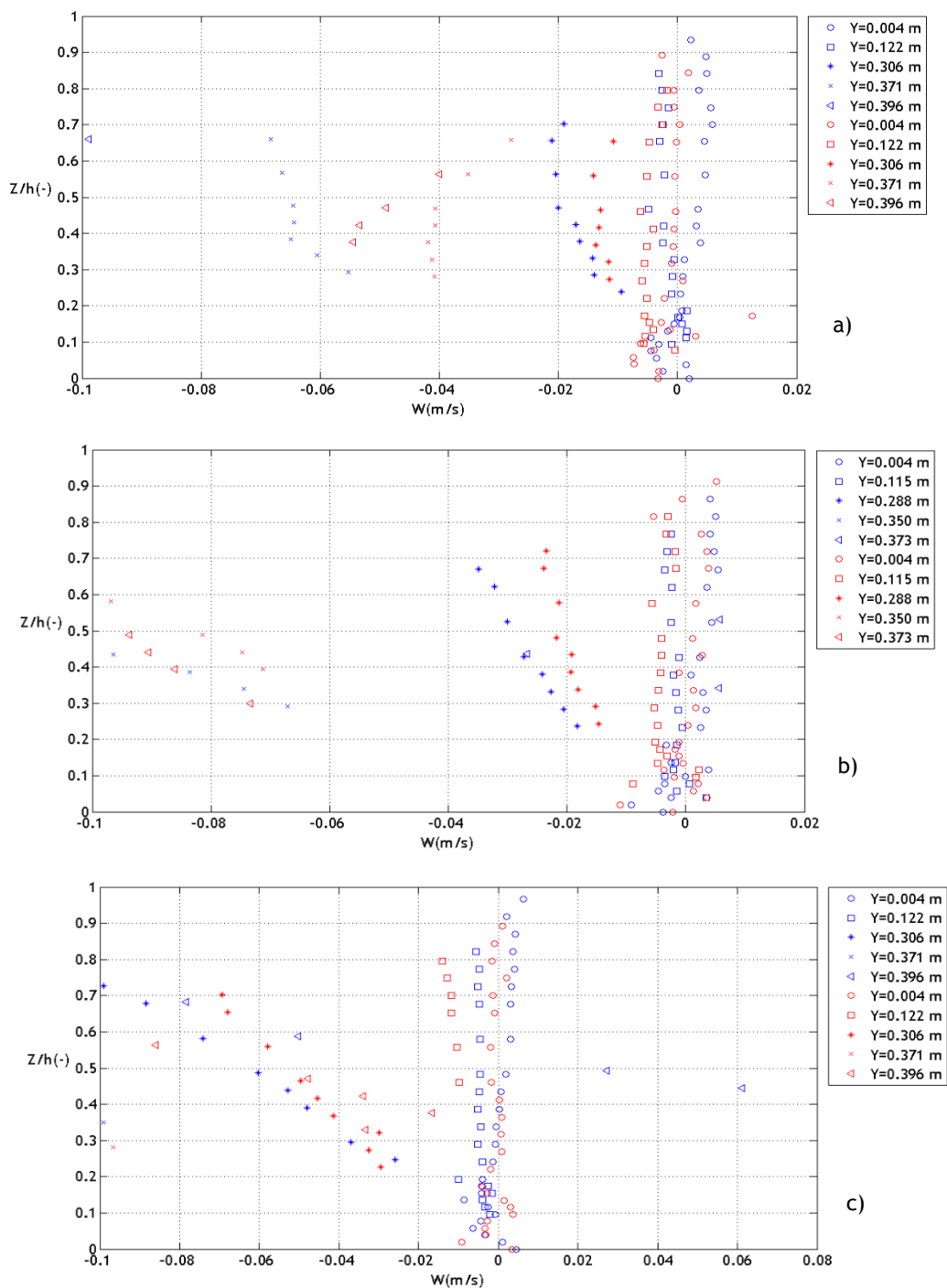


Fig. 6.19- Distribuição vertical da velocidade média do escoamento, componente vertical, W ,
a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

6.4.3 Intensidade turbulenta

Nesta subsecção apresenta-se a distribuição vertical das intensidades turbulentas das componentes u e w da velocidade, em vários perfis da malha de medição, que foram considerados como relevantes para análise do efeito da permeabilidade no campo de escoamentos em torno dos obstáculos.

Na Fig. 6.20 apresentam-se os perfis de intensidades turbulentas na direção longitudinal do escoamento.

Os perfis das intensidades turbulentas da componente u da velocidade do escoamento apresentam, na secção de montante, um comportamento praticamente idêntico em quase todas as verticais avaliadas. Havendo apenas uma verdadeira diferença ao nível da intensidade turbulenta U_{rms} , visível nas verticais V16, com $Y=0,396$ m. Onde os valores de intensidade turbulenta obtidos são superiores para o elemento permeável.

Na secção transversal do centro, as diferenças entre os efeitos induzidos no escoamento pelo elemento cilíndrico impermeável e permeável continuam a resumir-se apenas à zona da fronteira, onde a intensidade turbulenta continua a ser superior em torno do elemento composto por esferas de vidro.

A intensidade turbulenta da componente u , a jusante dos obstáculos, restringe-se a uma gama de valores muito mais pequena, aproximando-se dos 0,04 m/s. A zona de esteira turbulenta reflete-se no comportamento apresentado pela vertical mais próxima do elemento permeável.

A intensidade turbulenta na direção perpendicular ao fundo do canal, apresentada na Fig. 6.21, mostra-se muito regular. Facto já constatado aquando da caracterização do escoamento em torno de cada elemento cilíndrico. Faz-se apenas uma ressalva aos valores das verticais V16, da secção de jusante, que para o elemento impermeável se mostram superiores.

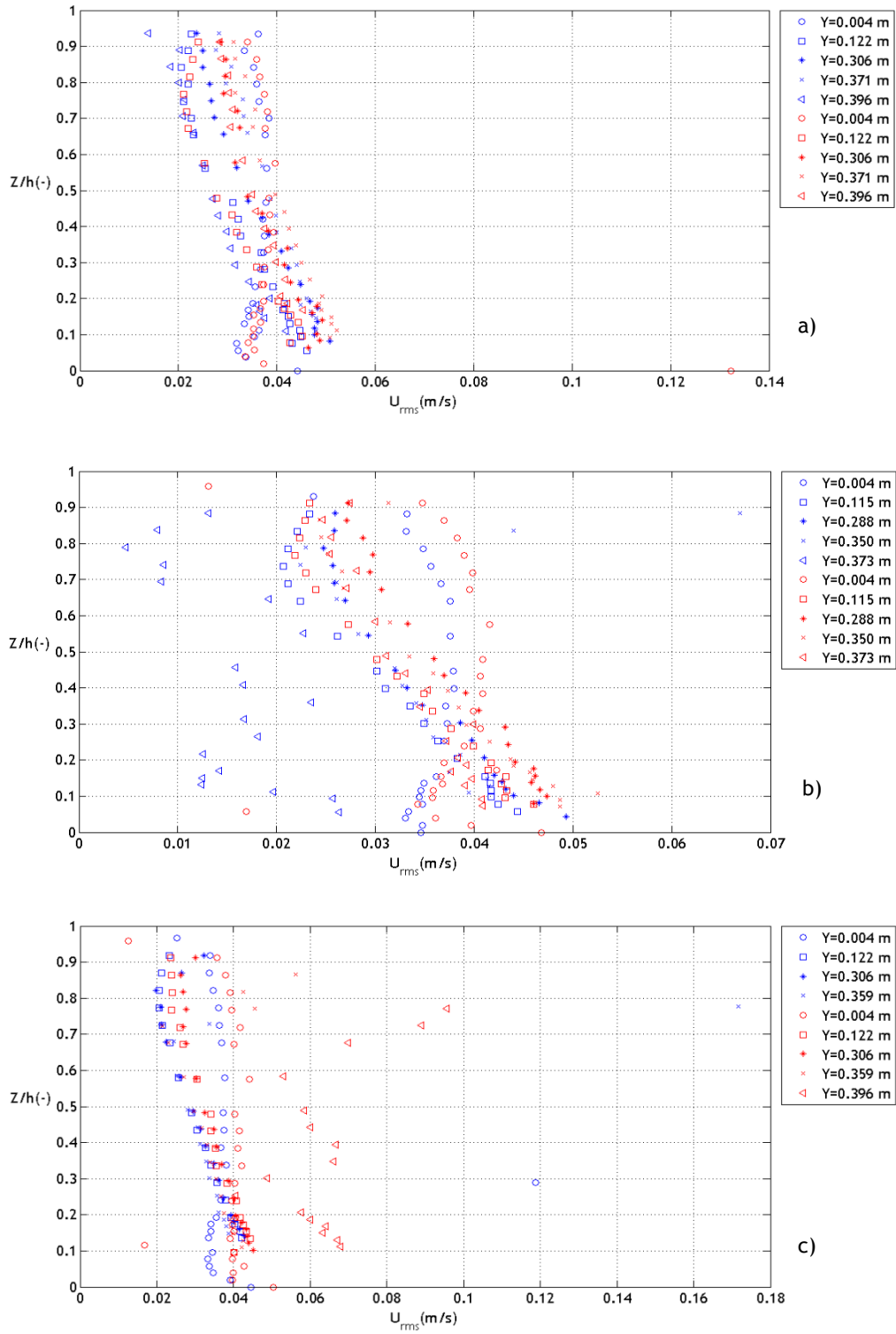


Fig. 6.20- Perfil vertical da intensidade turbulenta U_{rms} , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

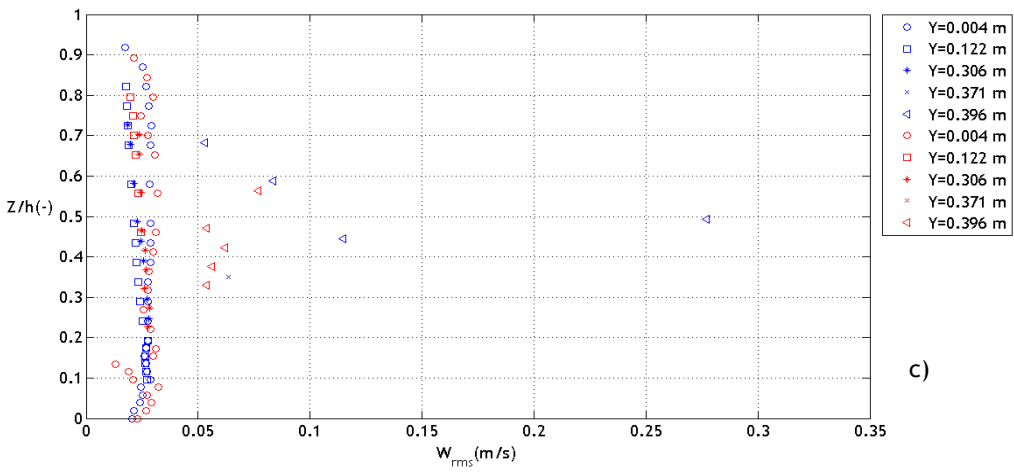
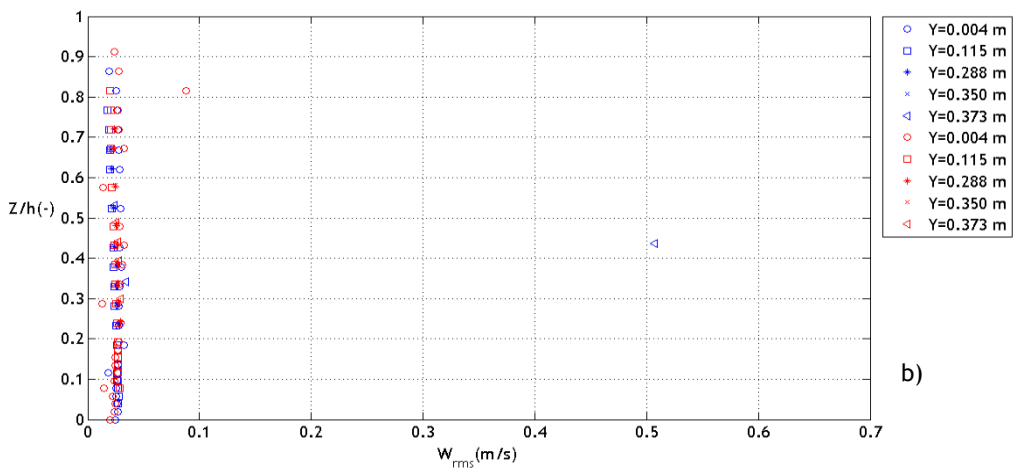
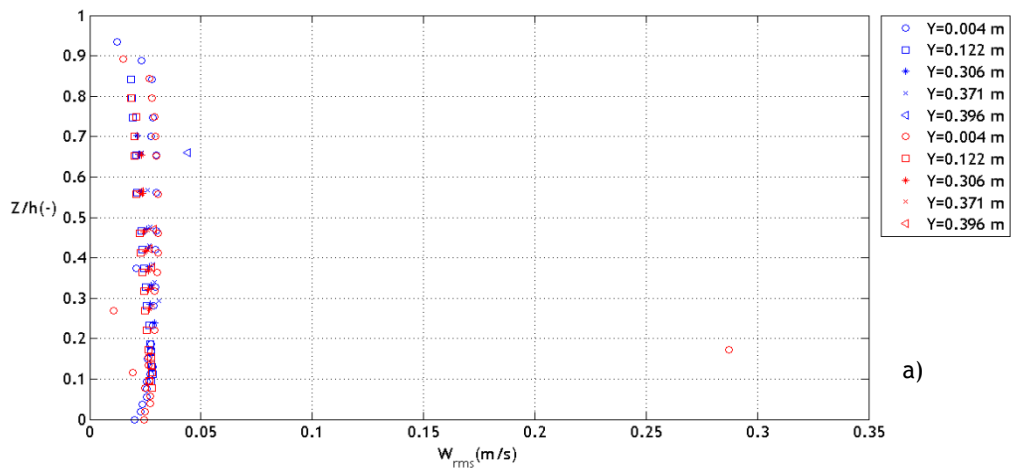


Fig. 6.21- Perfil vertical da intensidade turbulenta W_{rms} , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

6.4.4 Tensão de Reynolds

A análise da influência da permeabilidade de um elemento cilíndrico, introduzido no seio de um escoamento em superfície livre e no regime uniforme, termina com a apresentação, na Fig. 6.22, das respectivas tensões de Reynolds, τ_{xz} , geradas pelas flutuações instantâneas da velocidade.

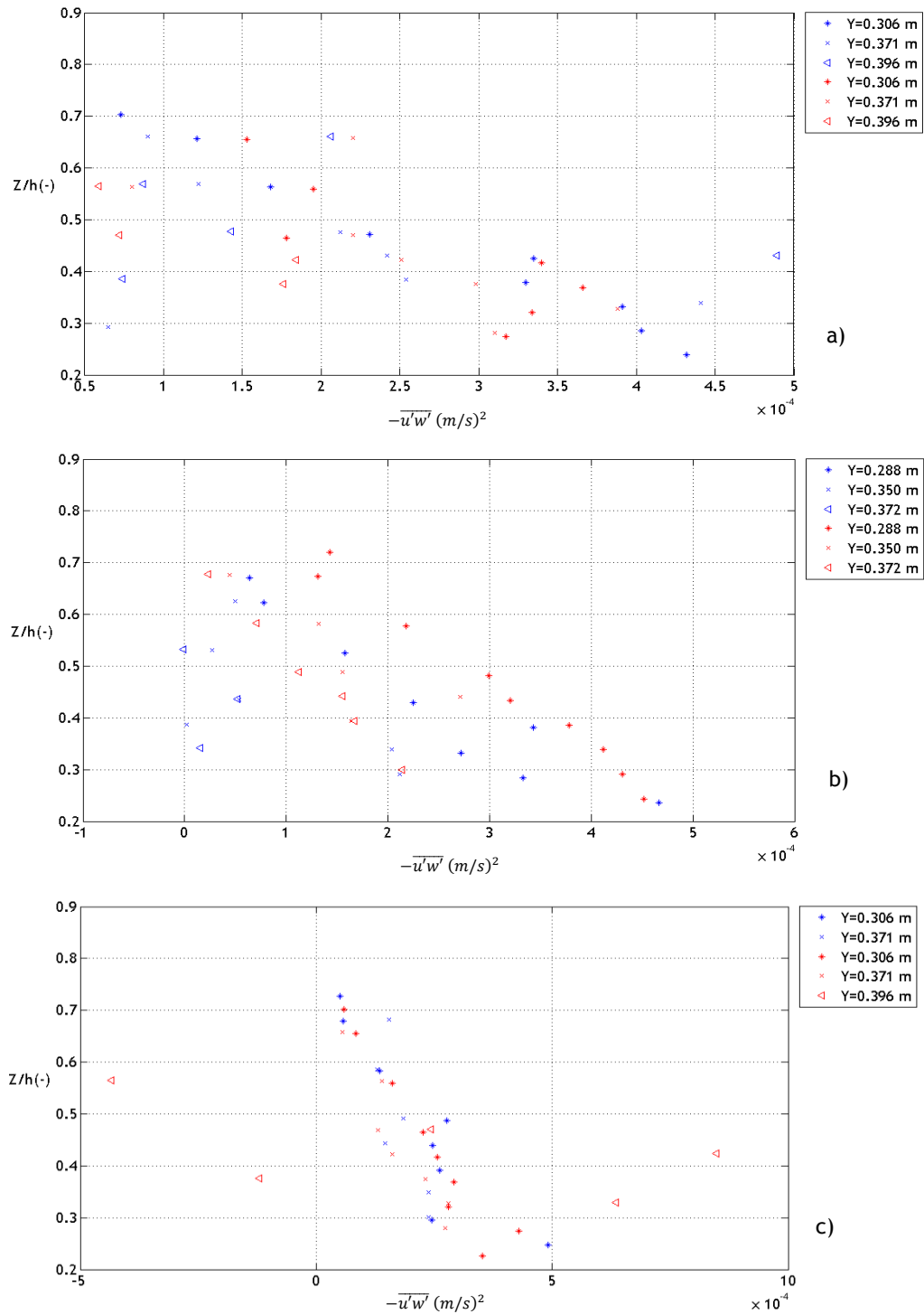


Fig. 6.22- Perfil vertical da tensão de Reynolds, τ_{xz} , a) Secção a montante; b) Secção do centro; c) Secção a jusante

Na figura, devido à elevada gama de valores registada nas tensões de Reynolds, para uma melhor interpretação, optou-se apenas pela representação das verticais mais próximas de cada elemento cilíndrico.

Na secção de montante, não é praticamente observada nenhuma distinção nos padrões da distribuição da tensão de Reynolds entre a estrutura impermeável e a permeável. Embora, esses padrões evidenciem diferenças com a aproximação, na secção transversal, ao obstáculo. Em todas as verticais apresentadas, os valores na metade inferior da altura de escoamento são superiores ao da metade próxima da superfície livre.

Na secção transversal do meio dos elementos cilíndricos, praticamente todos os valores dos perfis da tensão de Reynolds da estrutura permeável são superiores aos da estrutura impermeável. A jusante poucas diferenças são observáveis, embora seja visível uma grande amplitude nos valores do perfil mais próximo da estrutura permeável, mas que não pode ser comparado com a impermeável porque o respetivo perfil não pôde ser apresentado. Contudo, segundo Manes *et al.* (2009), que observou o oposto do efeito da permeabilidade nos resultados apresentados quanto à tensão de Reynolds, não será expectável que estes valores de tensão sejam menores que os do elemento impermeável.

7 Conclusões e propostas de trabalhos futuros

O estudo do efeito da permeabilidade associado a dois elementos cilíndricos, de eixo vertical, inseridos no seio de um escoamento turbulento, em regime uniforme, num canal hidráulico de leito fixo, foi realizado, através da medição das componentes instantâneas da velocidade, longitudinal e vertical, do vetor velocidade do escoamento, com recurso a um LDV. As medições das velocidades instantâneas foram realizadas em três secções transversais à direcção do escoamento. Os dois elementos cilíndricos ensaiados, um de PVC e outro de esferas de vidro, apresentavam porosidades de 0% e 49,6%, respetivamente. Após a compilação e tratamento dos dados adquiridos com o LDV, foram apresentados os contornos e as distribuições verticais das médias das componentes u e w da velocidade instantânea, dos vetores velocidade, das respetivas intensidades turbulentas, das tensões de Reynolds e das tensões tangenciais.

Através da caracterização do escoamento em torno de cada elemento cilíndrico e da comparação dos campos de escoamento, observou-se que:

- Os perfis verticais da componente u da velocidade média temporal, localizados no intervalo $0 \leq Y \leq 0,37$ m, apresentam a forma logarítmica, característica de escoamentos turbulentos. A componente w , neste intervalo transversal, mostra-se pouco alterada.
- Já os perfis verticais da mesma componente u , compreendidos no intervalo $0,37 \leq Y \leq 0,395$ m, deixam de apresentar uma forma logarítmica. Enquanto, os perfis de w se mostram bastante afetados, visível na grande amplitude de valores que apresentam.
- Como seria expectável, o escoamento de chegada ao elemento cilíndrico, é influenciado de forma diferente pela sua permeabilidade. No qual o retardamento do escoamento longitudinal é maior junto do elemento impermeável do que junto do elemento permeável. Sendo o escoamento descendente, crescente em profundidade, mais intenso no impermeável que no permeável. Em ambos os ensaios, a velocidade máxima de escoamento foi registada próxima de $Y=0,2$ m e um pouco abaixo da superfície livre.
- O escoamento que contorna os obstáculos, na região da fronteira, na secção do meio, mostra-se mais perturbado quando a fronteira é impermeável.
- A jusante, o efeito da permeabilidade da estrutura faz-se sentir na redução da componente u e no aumento da componente w da velocidade, comparativamente com a secção a jusante do elemento impermeável.
- Como o escoamento descendente a montante da estrutura permeável é menor e pelo facto de o escoamento a jusante apresentar um sentido descendente, as erosões localizadas e posterior transporte vão ser menores.

- O vetor velocidade apresentado, só muito próximo dos elementos cilíndricos regista alteração na intensidade, direção e sentido. Destacando-se, a montante do obstáculo impermeável, o significativo escoamento descendente, e a jusante do obstáculo permeável, a existência de um ligeiro escoamento descendente, capaz de promover a deposição dos sedimentos presentes no escoamento.
- A intensidade turbulenta da componente longitudinal é maior no escoamento junto da estrutura porosa, uma vez que, o escoamento não é tão 'linear' como junto da estrutura cilíndrica impermeável.
- Já a intensidade turbulenta da componente vertical, apresenta-se constante para quase todas as verticais apresentadas, excetuando as verticais alinhadas com o centro de cada pilar nas secções a jusante, uma vez esses perfis não se mostram lineares ao longo da altura de escoamento. Comportamento característico da esteira turbulenta, mais pronunciado no elemento impermeável.
- O facto de a estrutura permeável desenvolver um campo de escoamentos à sua volta mais desordenado, não permitirá o desenvolvimento, tão perfeito, dos sistemas de vórtices a montante nem a jusante, responsáveis pela erosão e transporte, respetivamente.
- As tensões de Reynolds são mais significativas na proximidade ao fundo do canal, havendo uma diminuição desta variável na aproximação à superfície livre. Entre os elementos cilíndricos, não foram registadas diferenças significativas.

Conclui-se que, o efeito da permeabilidade de um elemento cilíndrico, comparativamente a um elemento cilíndrico impermeável, inserido no seio de um escoamento turbulento, reduz a intensidade e o sentido descendente da componente vertical da velocidade do escoamento, a montante, e promove o escoamento descendente a jusante. Desta forma, a erosão localizada junto de elementos estruturais, a montante, é reduzida, e a jusante, a sedimentação é promovida.

Tendo presente que, neste tipo de estudos, a qualidade dos resultados obtidos é sensível a possíveis erros cometidos durante a campanha experimental e sendo possível melhorar as instalações laboratoriais, principalmente ao nível do equipamento de medição e posicionamento do mesmo, os resultados de futuras investigações podem ser otimizados. A possibilidade de conceber outros elementos cilíndricos com diferentes porosidades e até mesmo, com outras formas geométricas, constitui uma grande oportunidade para se continuar a análise do efeito da permeabilidade de uma estrutura no campo de escoamentos. Assim sendo, na linha do presente trabalho de investigação, poder-se-ia:

- Continuar o estudo da caracterização do escoamento tridimensional junto de elementos cilíndricos permeáveis, com a medição de velocidades em mais secções transversais, para uma melhor compreensão do escoamento de chegada e evolução deste a jusante, através da apresentação de planos verticais de isolinhas.

- Caracterizar experimentalmente a vorticidade gerada em torno de elementos cilíndricos permeáveis.
- Alargar a uma nova campanha experimental a caracterização do campo de escoamentos tridimensional em torno de estruturas de desenvolvimento vertical com diferentes geometrias e porosidades.
- Estudar a inserção de estruturas porosas verticais no seio de um escoamento em leitos móveis, para poder clarificar a capacidade erosiva dos vórtices e o transporte do material granular do fundo.
- Desenvolver um modelo numérico 3D que permita prever a evolução do comportamento do escoamento em torno de estruturas porosas.

Bibliografía

Ataie-Ashtiani, B. & Aslani-Kordkandi, A. 2013 - *Flow Field Around Single and Tandem Piers, Turbulence and Combustion*, vol. 90, nº 3, pp. 471-490.

Azevedo, R.; Leal, J.B. & Rojas-Solórzano, L. 2012 - *Influence of vegetation on compound-channel turbulent field*, River Flow, pp. 209-216.

Azevedo, R.; Filonovich, M. S., Rojas-Solórzano, L. & Leal, J. B. 2011 - *Influencia del efecto pared-lateral en flujos en canales asimétricos compuestos*, IX CONGRESO ANUAL DE INGENIERÍA ASME USB, Caracas - Venezuela.

Azevedo, R.; Rojas-Solórzano, L. & Leal, J.B. 2012 - *Experimental characterization of straight compound-channel turbulent field*, 2nd European IAHR Congress.

Baker, C. J. 1980 - *The turbulent horseshoe vortex*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 6, nº 1-2, pp. 9 - 23.

Baker, C. J. 1985 - *The position of points of maximum and minimum shear stress upstream of cylinders mounted normal to flat plates*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 18, nº 3, pp. 263 - 274.

Bey, A.; Faruque, M. A. A. & Balanchadar, R. 2007 - *Two-dimensional scour hole problem: Role of fluid structures*, Journal of Hydraulic Engineering, vol 133, nº 4, pp. 414 - 430.

Cardoso, A. H. 1998 - *Hidráulica Fluvial*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Chen, S. -C.; Kuo, Y. M. & Yen, H.-C. 2012 - *Effects of submerged flexible vegetation and solid structure bars on channel bed scour*, International Journal of Sediment Research, vol. 27, nº 3, pp. 323 - 336.

Dargahi, B. 1989 - *The turbulent flow field around a circular cylinder*, Experiments in Fluids, vol. 8, nº 1-2, pp. 1 - 12.

Fael, C.M.S. 2008 - *Erosões localizadas junto de encontros de pontes de respectivas medidas de protecção*, Doutorado em Engenharia Civil, UBI, Covilhã.

Goring, D. & Nikora, V. 2002 - *Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 128, nº 1, pp. 117 - 126.

Graf, W. H. & Istiarto, I. 2002 - *Flow pattern in the scour hole around a cylinder*, Journal of Hydraulic Research, vol. 40, nº 1, pp. 13 - 20.

Graf, W. H. & Yulistiyanto, B. 1998 - *Experiments on flow around a cylinder; the velocity and vorticity fields*, Journal of Hydraulic Research, vol. 36, nº 4, pp. 637 - 654.

Leu, J. M.; Chan, H. C. & Chu, M. S. 2008 - *Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel*, Flow Measurement and Instrumentation, vol. 19, nº 6, pp. 331 - 337.

Lu, J. M.; Chang, T.-F.; Chiew, Y.-M.; Hung, S.-P. *et al.* 2011 - *Turbulence characteristics of flows passing through a tetrahedron frame in a smooth open-channel*, Advances in Water Resources, vol. 34, nº 6, pp. 718 - 730.

Lu, J. Y.; Lai, J. S. & Lin, Y. B. 2009 - *Investigation of failure mechanism and new scour countermeasures at grade-control structures (2/2)*. Water Resources Agency, Taiwan.

Filonovich, M. S.; Azevedo, R.; Rojas-Solórzano, L. & Leal, J. B. 2010 - *Simulation of the velocity field in compound channel flow using different closure models*.

Manes, C.; Pokrajac, D.; McEwan, I. & Nikora, V. 2009 - *Turbulence structure of open channel flows over permeable and impermeable beds: A comparative study*, Physics of Fluids, vol. 21, nº 12.

Melville, B. W. 1975 - *Local scour at bridge sites*, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zeland, Report nº 117.

Melville, B. W. & Coleman, E. 2000 - *Bridge scour*, Water Resources Publication, LLC.

Nogueira, H. 2007 - *Pilares de pontes em leitos móveis*, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa.

Pokrajac, D. & Manes, C. 2009 - *Velocity Measurements of a Free-Surface Turbulent Flow Penetrating a Porous Medium Composed of Uniform-Size Spheres*, Transport in Porous Media, vol. 78, nº 3, pp. 367 - 383.

Quintela, A. C. 1981 - *Hidráulica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Scauder, I. & Moggridge, H. 2009 - *Vegetation and hydraulic-morphological interactions at the individual plant, patch and channel scale*, Aquatic Sciences, vol. 71, nº 3, pp. 318 - 330.

Tang, H.-W.; Ding, B.; Chien, Y.-M. & Fang, S.-L. 2009 - *Protection of bridge piers against scouring with tetrahedral frames*, International Journal of Sediment Research, vol. 24, nº 4, pp. 385 - 399.

Teixeira, E. J. A. 2011 - *Estudo experimental de escoamentos em regime uniforme e não uniforme em canais de secção composta*, Universidade Nova de Lisboa.

TSI 2005a - *LDV/PDPA SYSTEM Installation Manual*.

TSI 2005b - *LDV/PDPA System: Model FSA3500/4000 Signal Processor Model PDM1000 Photo Detector Module Instruction Manual*.

TSI 2006 - *Phase Doppler Particle Analyzer/Laser Doppler Velocimeter Operations Manual*.

Unger, J. & Hager, W. 2007 - *Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers*, *Experiments in Fluids*, vol. 42, n° 1, pp. 1 -19.

Urbano, C. O. & Téllez, J. 2013 - *Implementation and calibration of a laser Doppler velocimeter in order to measure liquids velocity*, *Rev. Mex. Fis. S*, vol. 59, n° 1, pp. 84 - 89.

