



Rodrigo Pires dos Santos

**Estimativa do caudal em rios através de
tratamento de imagem**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Supervisor: João Nuno Fernandes, PhD, FCT

Júri:

President: Prof. Doutor Rui Alexandre Baltazar Micaelo

Arguing: Prof. Doutor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2021

Rodrigo Pires dos Santos

**Estimativa do caudal em rios através de
tratamento de imagem**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Supervisor: João Nuno Fernandes, PhD, LNEC

Jury:

President: Prof. Doutor Rui Alexandre Baltazar Micaelo
Arguing: Prof. Doutor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco

Faculdade de Ciências e Tecnologias

Universidade Nova de Lisboa

Setembro, 2021

Obtenção de Caudal através de Tratamento de Imagem

© **Copyright, 2021, Rodrigo Pires dos Santos, Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa.**

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

Agradecimentos

Na realização desta dissertação contei com o apoio de várias pessoas que me ajudaram direta ou indiretamente a concretizar a mesma. Neste sentido, gostaria de expressar a minha gratidão:

Ao Professor Doutor João Nuno Fernandes, por me ter aceitado para abordar este tema. Como orientador sempre esteve disponível para me ajudar, quer na resolução de problemas que surgiram durante a execução da dissertação, quer na realização dos ensaios.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil por ter disponibilizado as suas instalações e os seus materiais para a execução dos ensaios sem qualquer tipo de limitações.

Ao Nuno Aido, designer do LNEC, por se ter disponibilizado para ajudar na execução dos ensaios de campo.

À minha família por sempre me apoiar e acreditar em mim, em especial aos meus pais, por toda a educação que me possibilitaram e toda a confiança que depositaram em mim desde o dia em que eu nasci.

Por último ao meu grupo de amigos por me acompanharem, por me darem força e por me ajudarem a desanuviar sempre que precisei. Um agradecimento especial ao Diogo Silva por ter disponibilizado o seu drone para a execução dos ensaios e à Inês Martins por ter ajudado na correção da dissertação.

Este trabalho foi realizado com o apoio da FEDER e da Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do Projeto MixFluv - Mistura de Camadas em sistemas fluviais (PTDC / ECI-EGC / 31771/2017).

Resumo

A Velocimetria de Imagens em Grande Escala (LSPIV) baseia-se na análise de uma sequência de imagens, permitindo medir o campo de velocidades 2D à superfície de um curso de água. Para esse efeito é necessária a existência de traçadores na superfície da água que sejam solidárias com a corrente. Isso pode passar pela necessidade de existência de partículas sólidas (detritos de plantas, pequenos flutuadores – naturais ou adicionados –, bolhas ou padrões de turbulência) de modo a serem reconhecidos de uma imagem para a outra.

A medição de caudais é essencial para vários aspetos, nomeadamente na gestão das necessidades de consumo de recursos hídricos, no tratamento de águas residuais, na produção de energia elétrica, na aferição das taxas de reservas de água nos aquíferos e na prevenção de inundações. Para que isto seja possível, em Portugal são efetuadas várias medições de caudais nas linhas de água. Contudo, nem sempre as condições são favoráveis para a realização destas medições. O método agora proposto oferece uma grande vantagem em relação aos métodos convencionais: não é intrusivo, ou seja, não irá perturbar o ecossistema em estudo nem alterar o caudal aquando da captura de vídeo. Outra vantagem deste método em comparação com os métodos convencionais é o facto de este poder ser usado em situações extremas (como cheias ou perto de estruturas hidráulicas – como barragens ou pontes) sem apresentarem grandes riscos tanto para o trabalhador como para o material.

Para comprovar este método realizaram-se ensaios em três canais do Pavilhão de Hidráulica Fluvial e Hidráulica de Estruturas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e um ensaio de campo num curso de água de maiores dimensões no Carregado, Portugal.

O estudo consistiu em examinar o tamanho e o formato dos traçadores que forneciam valores de velocidade superficial mais exatos e precisos. Utilizou-se traçadores quadrangulares de papel com 1, 2, 4, e 8 cm de lado e ainda o poliestireno. Verificou-se que quanto mais pequeno o traçador melhor é a caracterização do movimento superficial da água, sendo que, o melhor traçador foi o poliestireno. Como o poliestireno é prejudicial ao ambiente considerou-se que traçadores quadrangulares de papel com, no máximo, 4 cm de lado são adequados para a aplicação do método LSPIV.

Além do estudo aos traçadores, foi também efetuado um estudo ao coeficiente necessário aplicar às velocidades superficiais para obter as velocidades médias em altura. Concluiu-se que o coeficiente varia entre 0.85 e 1 e ainda que o seu valor aumenta com o aumento da altura de água, diminui com o aumento da rugosidade fundo e diferentes secções de escoamento possuem diferentes coeficientes.

Para aplicar o método LSPIV é necessário um drone com uma câmara digital incorporada, traçadores artificiais, caso os naturais não sejam suficientes, e um computador com um *software* de análise LSPIV. Para examinar as gravações captadas, nesta dissertação, foram utilizados dois *softwares*: o PIVlab e o Fudaa. Outro dos objetivos foi determinar qual destes *softwares* fornece resultados mais exatos e precisos. O PIVlab foi aquele que apresentou resultados mais coerentes em todos os casos de estudo.

Palavras-Chave: LSPIV, Velocidade média, velocidade superficial, coeficiente, traçadores e caudal.

Abstract

Large-scale Image Velocimetry (LSPIV) is based on the analysis of a sequence of images, allowing the measurement of the 2D velocity field at the surface of a watercourse. For this purpose, it is necessary to have contrasts on the water surface that are solidary with the flow. This may involve the need for solid particles (plant debris, small floats - natural or added -, bubbles or turbulence patterns) to be treated from one image to another.

Flow measurement is essential, namely in the management of the needs for the consumption of water resources, in the treatment of wastewater, in the production of electric energy, in the measurement of the rates of water reserves in aquifers and in the prevention of floods. To make this possible, in Portugal several flow measurements are made in rivers and waterbeds. However, the conditions of the rivers aren't always favorable for these measurements. The proposed method offers a great advantage over conventional methods: it isn't intrusive, i.e., it won't disturb the ecosystem under study or change the flow rate when capturing a video. Another advantage of this method compared to conventional methods is that it can be used in extreme situations (such as floods or near hydraulic structures - such as dams or bridges) without presenting big risks to the worker and the material.

To prove this method, tests were carried out on three channels of the Pavilion of Fluvial Hydraulics and Structural Hydraulics of the Department of Hydraulics and Environment of the National Civil Engineering Laboratory and a field test on a water course in Carregado, Portugal.

The study consisted of examining the size and shape of the tracers that provided the most accurate and precise surface velocity values. Square paper tracers with 1, 2, 4, 8 cm sides and polystyrene were used. It was found that the smaller the tracer, the better the characterization of the surface movement of the water. The best tracer was polystyrene. As polystyrene is harmful to the environment, it was considered square paper tracers, with a maximum of 4 cm on each side, are suitable for the application of the LSPIV method.

In addition to the study of tracers, was also carried out a study on the coefficient necessary to apply to the surface velocities to obtain the speed average. It was concluded that the coefficient is in between 0.85 and 1, the coefficient value increases with the increase of the water height, decreases with the increase of deep roughness and different flow sections have different coefficients.

To apply the LSPIV method, you need a drone with an incorporated digital camera, artificial tracers, if the natural ones are not enough, and a computer with LSPIV analysis software. To examine how recordings were captured, in this dissertation, two software's were used: PIVlab and Fudaa. Another objective was to determine which of these software offers more accurate and precise results. The PIVlab was the one that presented the most coherent results in all studies cases.

Keywords: LSPIV, Average speed, Surface velocities, Coefficient, Tracers and Flow

Índice

1	Introdução	1
1.1	Importância da medição de caudais na gestão dos recursos hídricos	1
1.2	Medição de caudais	1
1.3	Objetivo	3
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	Métodos e equipamentos para medição de velocidades e caudais	4
2.1	Considerações gerais	4
2.2	Medição de caudais	4
2.2.1	Método da secção-velocidade	4
2.2.2	Método estrutural	7
2.2.3	Método da Curva de Vazão	7
2.3	Equipamentos de Medição	8
2.3.1	Medição de alturas de água	8
2.3.2	Medição de velocidades	9
2.4	Velocimetria de Imagens de Partículas em Grande Escala	11
2.4.1	Velocimetria de imagens de partículas	11
2.4.2	Processamento de Imagem	12
2.5	Cálculo através da velocidade superficial	13
2.5.1	Cálculo através da velocidade superficial	13
2.5.2	Veículo aéreo não tripulado (UAV, Veículos aéreos não tripulados)	14
2.5.3	Traçadores	15
2.5.4	Captação de imagem	15
2.5.5	Cálculo do Caudal	16
3	Metodologia e ensaios realizados	18
3.1	Considerações gerais	18
3.2	Softwares informáticos utilizados	19
3.2.1	Considerações gerais	19
3.2.2	PIVLAB	19
3.2.3	FUDAA	22

3.3	Metodologia para análise aos traçadores	25
3.4	Metodologia para análise dos programas de LSPIV	26
3.5	Ensaio laboratoriais	26
3.6	Ensaio de campo.....	27
4	Procedimento experimental	28
4.1	Instalações laboratoriais	28
4.2	Ensaio em rio/canal.....	31
4.3	Equipamento utilizado.....	32
5	Resultados obtidos em laboratório.....	34
5.1	Secção simples trapezoidal	34
5.1.1	Procedimentos iniciais	34
5.1.2	Ensaio A1 – Secção simples trapezoidal (1 caudal, 2 traçadores e 1 <i>software</i> - PIVlab) 35	
5.1.3	Ensaio A2 – Secção simples trapezoidal (4 caudais, 1 traçador e 2 <i>softwares</i>).....	37
5.1.4	Análise de resultados	39
5.2	Secção composta.....	40
5.2.1	Procedimentos iniciais.....	40
5.2.2	Ensaio B1 – Secção composta (1 caudal, 3 traçadores, 1 <i>software</i> - PIVLAB).....	41
5.2.3	Ensaio B2 – Secção composta (3 caudais, 1 traçador, 2 <i>softwares</i>).....	42
5.2.4	Análise do coeficiente na secção composta	44
5.2.5	Análise de resultados	45
5.3	Secção simples retangular.....	47
5.3.1	Procedimentos iniciais.....	47
5.3.2	Ensaio C – Secção Simples retangular.....	47
5.3.3	Análise de resultados	49
5.4	Resumo dos ensaios laboratoriais.....	50
6	Estudos de campo.....	51
6.1	Procedimentos iniciais	51
6.2	Resultados	52
6.2.1	ADCP.....	52
6.2.2	Velocidades médias ADCP	53
6.2.3	LSPIV.....	54

7	Conclusões e trabalhos futuros.....	58
8	Referências	60

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Corte da secção transversal de um rio.	5
Figura 2.2 – Perfil vertical de velocidades de um rio.	6
Figura 2.3 – Limnímetro (adaptada de https://www.directindustry.es).	8
Figura 2.4 – Sonda Acústica.	9
Figura 2.5 – Molinete (adaptada de Aguiar, 2011).	9
Figura 2.6 – ADCP (modelo: StreamProADCP adaptada de https://frontierprecision.com/).	10
Figura 2.7 – (a) Divisão da imagem em áreas de interrogação ($t = t_0$); (b) Seleção de uma área de interrogação na primeira imagem ($t = t_0$) e (c) Seleção da mesma área de interrogação através do coeficiente de correlação cruzada ($t = t_0 + dt$). (adaptada de Muste et al., 2008).	12
Figura 2.8 – Divisão da secção transversal e representação do perfil de velocidades.	16
Figura 2.9 – Perfil de velocidades em 2D.	17
Figura 3.1 – Esquema dos passos realizados para a estimativa de caudal com o LSPIV.	18
Figura 3.2 – a) Importar imagens para análise e b) importar vídeo para análise.	19
Figura 3.3 – Seleção da secção para a análise.	20
Figura 3.4 – Filtros disponíveis no <i>software</i> PIVlab.	20
Figura 3.5 – Métodos de análise e escolha da área de interrogação no <i>software</i> PIVlab.	21
Figura 3.6 – Calibração das imagens no <i>software</i> PIVlab.	21
Figura 3.7 – Campo de velocidades superficiais no <i>software</i> de análise PIVlab.	22
Figura 3.8 – (a) secção do <i>software</i> (<i>source images management</i>) que permite importar imagens consecutivas para análise com um intervalo de tempo conhecido e (b) secção do <i>software</i> (<i>import images from a vídeo</i>) que permite importar um vídeo para análise.	23
Figura 3.9 – Perspetiva de onde é obtida a captura de imagens em (a) <i>complete orthorectification</i> e em (b) <i>scaling</i> (adaptado de Jodeau et al., 2018).	23
Figura 3.10 – Parâmetros para definir a área de interrogação e a área de procura (adaptado de Jodeau et al., 2018).	24
Figura 3.11 – Exemplo da movimentação das áreas de interrogação e de procura no cálculo das velocidades superficiais (adaptado de Jodeau et al., 2018).	24
Figura 3.12 – Exemplo de como obter o campo de velocidades superficiais no Fudaa.	25
Figura 3.13 – Esquema de todos os ensaios realizados na dissertação.	27
Figura 4.1 – Secção transversal do canal de secção composta.	28
Figura 4.2 – a) Fotografia da secção composta analisada e b) Fotografia da secção central da secção composta simulando uma secção simples.	29
Figura 4.3 – a) Representação da secção transversal e b) Fotografia em planta do canal.	30
Figura 4.4 – a) Vista aérea, tirada do Google Maps, da área onde foram realizados os ensaios, e b) fotografia tirada no local dos ensaios.	31
Figura 4.5 – Secção transversal do curso de água ensaiado em campo.	31
Figura 5.1 – Imagens de cada traçador analisado neste ensaio em que a) corresponde à análise com os traçadores de 2.5 cm de lado e b) com o poliestireno como traçador.	35

Figura 5.2 – Comparação das velocidades médias obtidas com o ADV com as velocidades superficiais adquiridas com o PIVlab com poliestireno e com papel 2,5x2,5 na secção simples.	36
Figura 5.3 – Comparação das velocidades superficiais, adquiridas com o PIVlab e com o Fudaa, com as velocidades médias obtidas com o ADV na secção simples.	38
Figura 5.4 – Imagens de cada traçador analisado neste ensaio em que a) corresponde aos traçadores de 4 cm de lado, b) ao traçador de 8 cm de lado e c) ao poliestireno.	41
Figura 5.5 – Comparação das velocidades superficiais adquiridas entre o poliestireno, o papel 4x4, papel 8x8 e as velocidades médias adquiridas com o ADV, na secção composta.	41
Figura 5.6 – Comparação das velocidades superficiais obtidas com o LSPIV e as velocidades médias do ADV na secção composta.	43
Figura 5.7 – Velocidades médias dos três caudais testados aplicando diferentes coeficientes em cada leito.	45
Figura 5.8 – Uma das imagens analisadas neste ensaio de secção simples retangular.	48
Figura 5.9 – Velocidades superficiais obtidas com o PIVlab e com o Fudaa na secção simples rectangular.	48
Figura 6.1 – a) Estrutura utilizada para suportar o ADCP e b) ADCP já instalado no curso de água pronto a realizar medições	51
Figura 6.2 – Valores das velocidades médias medidas com o ADCP em campo.	53
Figura 6.3 – Imagens de cada traçador analisado neste ensaio em que a) corresponde à análise com o traçador de 1 cm de lado, b) com o traçador de 2 cm de lado e c) com o traçador de 4 cm de lado... ..	54
Figura 6.4 – Comparação dos valores de velocidade média obtidos com o ADCP e os valores de velocidade superficial obtidos com o PIVlab.	55
Figura 6.5 – Comparação dos valores de velocidade média obtidos com o ADCP e os valores de velocidade superficial obtidos com o Fudaa.	55

Índice de Quadros

Quadro 5.1 – Condições dos ensaios A1.....	35
Quadro 5.2 – Comparação do caudal calculado aplicando um coeficiente teórico igual a 0.9 às velocidades superficiais com o caudal imposto a montante.	36
Quadro 5.3 – Condições do escoamento nos ensaios A2.	37
Quadro 5.4 – Comparação de caudais entre os dois <i>softwares</i> com um coeficiente teórico igual a 0.90.	39
Quadro 5.5 – Coeficiente prático necessário aplicar às velocidades superficiais, no PIVlab e no Fudaa, de modo a obter o caudal imposto.	39
Quadro 5.6 – Caracterização da secção de escoamento no ensaio B1.	41
Quadro 5.7 – Comparação entre o caudal imposto a montante com o caudal calculado a partir do coeficiente teórico igual a 0.85.	42
Quadro 5.8 – Condições dos ensaios B2.	43
Quadro 5.9 – Comparação de caudais entre os dois <i>softwares</i> com um coeficiente teórico igual a 0.85.	44
Quadro 5.10 – Valores de coeficiente prático que seria necessário aplicar para obter o caudal imposto a montante.	44
Quadro 5.11 – Valores dos coeficientes práticos em cada um dos leitões, nos dois <i>softwares</i> de análise.	45
Quadro 5.12 – Condições dos ensaios na secção retangular.	48
Quadro 5.13 – Valores de caudal calculados com um coeficiente teórico igual a 0.85 e respetivos erros.	49
Quadro 5.14 – Coeficientes práticos obtidos na secção simples retangular.	49
Quadro 5.15 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório.	50
Quadro 6.1 – Características do escoamento do ensaio de campo	53
Quadro 6.2 – Comparação entre o caudal calculado com o ADCP e com LSPIV, utilizando um coeficiente teórico de 0.9.....	56
Quadro 6.3 – Coeficientes práticos aplicados às velocidades superficiais de modo a obter o caudal do escoamento.	57

1 Introdução

1.1 Importância da medição de caudais na gestão dos recursos hídricos

A água é um recurso natural indispensável à vida humana. Apesar da superfície do Planeta Terra ser constituída por cerca de 70% de água, apenas uma pequena percentagem (cerca de 2.5%) corresponde a água doce. Além disso, da água doce existente nem toda está disponível para o consumo humano uma vez que a maior parte encontra-se no estado sólido ou no subsolo. Desta forma, a fração da água doce que se encontra em lagos, rios e disponível para consumo é muito reduzida.

O ciclo hidrológico compreende um processo de renovação através da precipitação, infiltração, escoamento e evapotranspiração permitindo a regeneração da água. A importância da água nas décadas mais recentes para atividades humanas, industriais e agrícolas tem levado ao aumento da sua procura. O homem é um interveniente ativo no ciclo hidrológico, nomeadamente no chamado ciclo urbano. Depois de utilizar a água para consumo da população, indústria e desenvolvimento agrícola a água retorna ao ciclo hidrológico. Geralmente, essa água é devolvida ao meio recetor com menor qualidade obrigando, na maioria dos casos, a um tratamento prévio.

Uma gestão eficaz dos recursos hídricos deve ser baseada em informação viável, entre a qual o registo frequente de caudais é essencial. A partir desse registo é possível controlar e assegurar as necessidades de consumo de volumes de água em áreas urbanas e rurais, o tratamento de águas residuais, a produção de energia elétrica e a preparação para a ocorrência de acontecimentos extremos como secas ou cheias. Esses registos irão permitir a diminuição de possíveis danos humanos e financeiros, fornecer informação necessária para a realização de obras hidráulicas e a verificação da concretização de acordos bilaterais em relação a rios internacionais.

Neste momento, a convenção de Albufeira (Resolução da Assembleia da República, 1998) estabelece os vários acordos entre Portugal e Espanha acerca da gestão dos principais rios partilhados pelos dois países, sendo um bom exemplo da colaboração bilateral relativa aos rios transfronteiriços. O objetivo é harmonizar o aproveitamento dos recursos hídricos de modo a beneficiar ambos os países e proteger as águas superficiais, subterrâneas e os ecossistemas.

O cumprimento da legislação atual exige mecanismos fiáveis e flexíveis para a monitorização prolongada e constante de caudais em rios, o que exige o controlo não só da qualidade, mas também da quantidade dos recursos hídricos. (Cunha, 2010).

Deste modo, as medições de caudal revelam-se uma ferramenta indispensável na resolução de problemas da gestão de recursos hídricos. Ao longo dos anos as tecnologias de medição de caudais têm vindo a sofrer alterações de forma a tornar a sua medição mais rápida e eficaz.

1.2 Medição de caudais

A otimização dos sistemas de registo de escoamento superficial deve ser realizada através de um planeamento rigoroso e de um conhecimento prévio das características gerais dos regimes fluviais. Desta forma, para linhas de água relevantes, considera-se essencial a realização de medições em pontos estratégicos e em várias secções de modo a monitorizar os caudais ao longo do rio e perceber

a contribuição das várias subbacias e dos possíveis fenómenos de amortecimento como barragens ou açudes.

De acordo com Boiten (2003), os métodos de medição de caudais podem ser divididos em dois grandes conjuntos principais, os que resultam de medições isoladas e os que resultam de medições ou registos contínuos. Dos métodos usados para medição de caudais destacam-se os seguintes:

- Método da secção-velocidade;
- Método estrutural;
- Método da curva de vazão.

O Método da secção-velocidade (medição isolada), consiste na multiplicação da área da secção transversal do curso de água pela velocidade média do escoamento de água que passa nessa secção. O aspeto positivo deste método é não necessitar de um grande orçamento para a sua aplicação. Contudo, a sua fiabilidade pode ser posta em causa, caso as condições do aparelho de medição sejam deficientes e as condições de escoamento não sejam favoráveis (por exemplo, devido a turbulência do escoamento). Além disso, a medição da velocidade média de escoamento pode nem sempre ser conseguida de forma rigorosa e simples.

O método estrutural (medição contínua) recorre à instalação de estruturas hidráulicas fixas em pontos estratégicos dos canais. O fundamento para este método baseia-se no facto de que pode ser determinada uma relação entre o caudal e a altura de água a montante da estrutura (carga hidráulica). Este método não é utilizado apenas para medição de caudal, mas também para contenção de água, além disso não são necessários grandes requisitos de manutenção e a precisão não é afetada pela velocidade do fluido. Porém, o custo da sua instalação é elevado e complexo, em algumas situações.

O método da curva de vazão (medição contínua) baseia-se na avaliação do caudal por medição da altura hidrométrica. A relação entre estas duas grandezas é o que permite determinar o caudal num determinado canal, sendo necessário a existência de um registo contínuo de níveis na mesma secção. Uma vez calibrada a expressão da curva de vazão, a monitorização do caudal ao longo do tempo fica mais simples. Apesar disso, a realização de medições contínuas não são economicamente viáveis. Quanto maior o intervalo de tempo entre medições menor será a precisão da curva – devido à constante alteração das secções dos rios, causado pelo transporte de sedimentos e consequentes fenómenos de sedimentação ou erosão.

No capítulo 2 estes métodos serão apresentados de forma mais detalhada e fundamentada abordando-se a forma de obtenção de caudais, o modo de aplicação e os equipamentos necessários.

Em Portugal, o Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) dispõe de uma rede de monitorização de dados hidrométricos, meteorológicos e de qualidade de água (superficial e subterrânea). A rede de monitorização é composta por estações hidrométricas (automáticas e convencionais) onde é efetuada a medição de caudais pelo método da curva de vazão. O portal do sistema (<https://snirh.apambiente.pt/>) também divulga sínteses mensais temáticas, visando a caracterização das disponibilidades hídricas nacionais, relatórios técnicos, cartografia sobre recursos hídricos (zonas inundáveis, por exemplo), documentos técnicos e fotografias relacionadas com os recursos hídricos.

1.3 Objetivo

Na presente dissertação pretende-se, a partir do método Velocimetria de Imagem de Partículas em Grande Escala (LSPIV¹), determinar o caudal escoado num curso de água. A técnica LSPIV foi desenvolvida a partir da Velocimetria de Imagem de Partículas (PIV), um método inicialmente utilizado para medir velocidades de escoamento em pequenos cursos de água. O LSPIV permite fornecer campos de velocidade que abrangem grandes áreas de escoamento em condições de campo ou laboratório.

Quanto à eficiência, o LSPIV pode ser usado em qualquer local onde o caudal do canal ou rio possa ser observado. Estas velocidades podem ser obtidas em apenas alguns segundos. Em relação à precisão, o LSPIV depende essencialmente do desempenho de câmaras digitais, para a aquisição de um vídeo da circulação da água, e de um *software*, de modo a analisar esse mesmo vídeo e produzir vetores de velocidades superficiais.

O principal objetivo da dissertação passa pela possibilidade de avaliação do caudal em rios através do método LSPIV. Desta forma, pretende-se separadamente:

- a. Averiguar a possibilidade de medição das velocidades superficiais por este método;
- b. Verificar a relação dessas velocidades com a velocidade média na altura;
- c. Efetuar a estimativa do caudal.

Deseja-se ainda comparar o nível de precisão desta técnica com as técnicas existentes e verificar se o método é viável ou não de modo a atualizar procedimentos operacionais e processos de medição para a monitorização de caudais em rios.

Primeiramente serão realizados ensaios no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em canais com diferentes secções transversais. Numa segunda fase os ensaios serão realizados num canal de maiores dimensões situado no Carregado, em Portugal.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos principais. Após a presente introdução, no Capítulo 2 são apresentadas algumas considerações de revisão bibliográfica tais como os métodos e os equipamentos para medição de velocidades e caudais.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia seguida para atingir os objetivos e são enunciados os ensaios realizados.

No Capítulos 4 são apresentadas as instalações laboratoriais e o trabalho de campo, mencionando-se todo o material necessário para a execução e análise dos ensaios.

O Capítulo 5 apresenta os respetivos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, sendo os resultados de campo apresentados no Capítulo 6.

Por fim, no Capítulo 7 é realizada uma análise, em que são retiradas as principais conclusões de todos os ensaios executados e são efetuadas recomendações para estudos futuros dentro da temática abordada.

¹ Ao longo desta dissertação irá utilizar-se o acrónimo em inglês. Neste caso, LSPIV corresponde a *Large Scale Particle Image Velocitmetry*.

2 Métodos e equipamentos para medição de velocidades e caudais

2.1 Considerações gerais

Sendo o tema da dissertação relacionado com a medição de caudais recorrendo a métodos de medição de velocidade à superfície por tratamento de imagem, optou-se por incluir no presente capítulo os principais métodos e equipamentos disponíveis para a medição de velocidades e caudais em rios.

Desta forma, no capítulo 2.2 são detalhados os métodos de medição de caudais, nomeadamente os referidos anteriormente: Método da secção-velocidade; Método estrutural e Método da Curva de vazão.

Para a avaliação dos caudais em rios, esses métodos carecem da medição da velocidade em profundidade e de alturas de água. Os equipamentos para efetuar essas medições são apresentados no capítulo 2.3.

Por fim, é apresentada a Velocimetria de Imagem de Partículas em Grande Escala no capítulo 2.4 e o cálculo da velocidade superficial no capítulo 2.5.

2.2 Medição de caudais

2.2.1 Método da secção-velocidade

O método da secção-velocidade tem por base a definição de caudal, ou seja, baseia-se na integração das velocidades na secção de escoamento, equação 2.1.

$$Q = \int V dA \quad (2.1)$$

Em que:

Q Representa o caudal;

V Velocidade na área elementar dA e perpendicular a dA .

Assumindo uma velocidade média na secção, \bar{V} , a equação anterior reduz-se a:

$$Q = \bar{V}A \quad (2.2)$$

Do ponto de vista operacional, deve ser selecionada uma secção transversal em que a direção principal de escoamento seja perpendicular a ela, sendo o ideal a seleção de trechos retilíneos. Para avaliar a área da secção é necessário determinar a sua largura e profundidade em vários pontos verticais, Figura 2.1. É possível conhecer a largura do rio a partir de uma fita graduada, quando a linha de água assim o permite. Devido à possível ocorrência de uma flecha na fita, estas medições podem estar sujeitas a erros. Quanto maior a distância entre pontos maior será o erro associado.

Nos casos em que a medição manual é impossível, podem ser utilizados instrumentos óticos ou eletrônicos para a medição da distância, ou um sistema de posicionamento global diferencial.

Em relação à profundidade, as medições não devem ser efetuadas com intervalos muito elevados de forma a obter um perfil da secção transversal mais exato. Caso o rio permita, estas medições podem ser feitas com hastes e com um operador dentro de água. Em rios com grandes profundidades e velocidades de corrente muito elevadas pode ser utilizado um cabo graduado com peso na ponta, que permita assentar no fundo do leito, e um eco sonda ou outro equipamento de sondagem de profundidades. A estas medições existem sempre erros associados desde a impossibilidade de manter a haste na vertical, à penetração da ponta da haste no leito ou mesmo devido à natureza do leito (quando é utilizada a eco sonda).

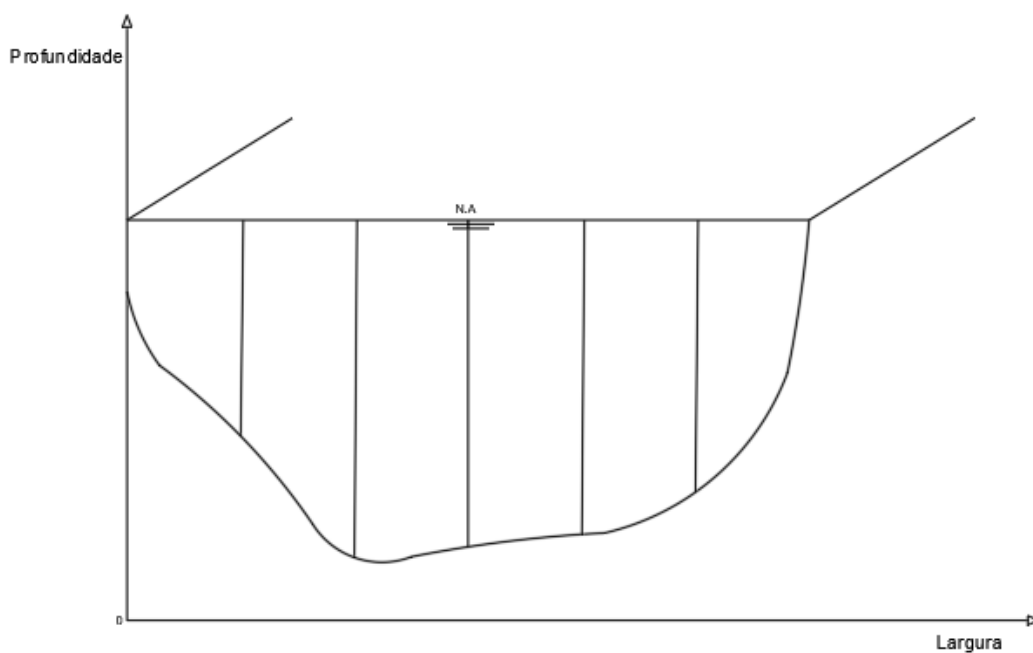


Figura 2.1 – Corte da secção transversal de um rio.

O perfil vertical de velocidades tem um formato parecido ao logarítmico, variando de zero no fundo do rio e com o seu valor máximo próximo da superfície, Figura 2.2. Esta variação de velocidades é causada pela fronteira fixa, pelo atrito existente entre o fundo e o fluído e entre as várias “camadas” de fluído devido à viscosidade. A existência de vento no decorrer das medições pode ser um fator desvantajoso, pois quando este possui uma direção contrária ao sentido da corrente, a velocidade à superfície pode ser inferior. Se o oposto acontecer e o vento for na direção da corrente a velocidade superficial poderá ser superior.



Figura 2.2 – Perfil vertical de velocidades de um rio.

A velocidade média na altura pode ser obtida através de vários métodos, dependendo do tempo disponível e da precisão pretendida. À partida, quanto mais pontos possam ser levantados na altura, melhor será aferida essa velocidade média. É fundamental que seja possível realizar as medições da velocidade às profundidades pretendidas, cobrindo a maior área possível na secção transversal.

A velocidade média de escoamento numa dada vertical (V_h) pode ser obtida através da integração do diagrama de velocidades, equação 2.3.

$$V_h = \frac{\int_h V dh}{h} \quad (2.3)$$

Em que:

- V Valor da velocidade a determinada altura de escoamento;
- h Profundidade.

No método dos dois pontos, como o nome indica, efetuam-se medições da velocidade em dois pontos. As medições de velocidade são medidas a 20 e a 80% da altura de água em cada vertical, V_{20} e V_{80} , respetivamente. A velocidade média na altura, V_h , é obtida através da equação 2.4.

$$V_h = \frac{1}{2} (V_{20} + V_{80}) \quad (2.4)$$

Para aumentar a precisão da medição podem ser medidas, em cada vertical, mais pontos de velocidades. Realizando medições de velocidade em 4 pontos correspondentes a 20, 40, 70 e 90% da altura de água, a velocidade média na altura resultaria:

$$V_h = \frac{1}{4} (V_{20} + V_{40} + V_{70} + V_{90}) \quad (2.5)$$

No registo das velocidades nos aparelhos de medição é recomendado medir durante um período mínimo de maneira a encontrar valores mais fiáveis. Na maioria dos casos que ocorrem na natureza, o escoamento é turbulento provocando flutuações nas velocidades em qualquer ponto em torno do seu valor médio. Deverá, por isso, estudar-se o tempo mínimo de medição que conduza a valores médios com a precisão suficiente para a estimativa da velocidade média.

Depois de avaliadas as áreas de cada subsecção e as suas respectivas velocidades médias é feito o somatório de todos os caudais parcelares, Q_i , de modo a descobrir o caudal total, Q_t :

$$Q_t = \sum Q_i = \sum v_{h_i} A_i \quad (2.6)$$

Existem diversos erros associados na obtenção do caudal pelo método secção-velocidade. Le Coz et al.(2012) identifica os principais: os relacionados com a existência de material em suspensão interferindo com a performance do equipamento, com vento que introduza perturbação significativa no escoamento e com o facto do aparelho não ser segurado com firmeza. Todas as medições estão sujeitas a incertezas, para as otimizar é preciso conhecer a precisão que pode ser obtida quando se mede cada uma das componentes.

2.2.2 Método estrutural

Este método recorre a estruturas fixas (e.g. descarregadores) ou móveis (descarregadores portáteis, do tipo Parshall) para a medição de caudais fluviais. Ambas as estruturas são mais frequentes nos troços superiores e médios dos cursos de água do que nos finais, devido aos maiores volumes de água existentes a jusante. Nos troços superiores, Cunha (2010) identifica a existência do fenómeno de transporte sólido (caudal sólido em arrastamento) como uma possível fonte de problemas.

Os descarregadores estão destinados a serem galgados pela água, sendo o caudal facilmente calculado a partir da altura de escoamento sobre a crista do descarregador. Desta forma, é possível avaliar o caudal num rio através da relação de nível de água a montante e a jusante da estrutura. A expressão para calcular o caudal que atravessa cada descarregador estará relacionada com a carga e a geometria do descarregador utilizado.

Os descarregadores mais comuns são os de soleira delgada e os de soleira espessa. Considera-se descarregador de soleira delgada quando a soleira em contacto com água tem dimensões desprezíveis em relação à sua altura e de soleira espessa nos restantes casos.

2.2.3 Método da Curva de Vazão

O método da curva de vazão permite determinar o caudal existente num rio através do conhecimento da altura de água. Para ser possível avaliar esta curva é necessário realizar medições de caudais frequentes (por exemplo pelo método de secção-velocidade) para diferentes alturas hidrométricas. Após essa medição frequente, pode ser calibrada uma curva que relacione as alturas hidrométricas com os caudais. Com a constante evolução dos cursos de água, nomeadamente pelos

processos hidromorfológicos de erosão ou sedimentação, é necessária uma atualização frequente das curvas de vazão, o que muitas das vezes não acontece.

Analiticamente, as curvas de vazão têm a forma genérica apresentada pela equação 2.7.

$$Q = a (h+h_0)^b \quad (2.7)$$

Em que:

- h Altura hidrométrica;
- h₀ Altura do zero da escala hidrométrica em relação ao nível de água a que corresponde o caudal nulo (cota mais baixa);
- a e b Parâmetros característicos da secção, a calibrar em função da curva de vazão obtida num dado momento (por exemplo, através do método secção velocidade).

2.3 Equipamentos de Medição

As grandezas normalmente medidas em hidráulica são a altura de água, pressões, velocidades de escoamento e caudal. Tendo em conta as características do escoamento, pode ser necessário medir a concentração do ar e caracterizar a hidromorfologia. A escolha do equipamento irá depender do grau de precisão desejado, da configuração do meio, do orçamento disponível e do caudal esperado. Nesta dissertação apresentam-se apenas alguns dos equipamentos normalmente utilizados para a medição de alturas de água e velocidades, uma vez que são os mais utilizados para estimativa de caudais.

2.3.1 Medição de alturas de água

Para a medição dos níveis de água, os aparelhos mais comuns são os limnímetros, Figura 2.3, que correspondem a réguas graduadas com o comprimento suficiente para registar todos os níveis de flutuação que se espera que possam ocorrer. O resultado das medições é, normalmente, transmitido ao aparelho de registo (limnógrafo).



Figura 2.3 – Limnómetro (adaptada de <https://www.directindustry.es>).

Recentemente, tem-se optado pelo uso de sondas acústicas, Figura 2.4. Estas permitem determinar a distância entre o sensor e a superfície livre, através da medição do tempo entre a emissão e a recepção de ultrassons. Com o conhecimento da velocidade do som é, assim, possível calcular a distância percorrida pelo som (emitido e eco) utilizando o efeito de *Doppler*.



Figura 2.4 – Sonda Acústica.

2.3.2 Medição de velocidades

As velocidades eram, tradicionalmente, medidas por molinetes – sensores mecânicos que possibilitam a medição num ponto específico no seio do escoamento, Figura 2.5. Segundo Cunha (2010), neste tipo de medição a energia cinética da água que passa por uma dada área transforma-se em movimento de rotação de um mecanismo. A velocidade da corrente, nesse ponto, obtém-se através de uma curva de calibração que relaciona o número de rotações da hélice numa unidade de tempo com a velocidade nesse ponto.



Figura 2.5 – Molinete (adaptada de Aguiar, 2011).

Atualmente, podem ser utilizados outros tipos de sensores nomeadamente os acústicos baseados em tecnologia tipo *Doppler* entre os quais os que recorrem a tecnologia *Acoustic Doppler Velocimetry* (ADV). Estes usam um método ultrassónico onde o elemento de transmissão projeta um sinal contínuo que irá emitir ondas. O eco resultante da reflexão do som nas partículas suspensas na água, será recebido de volta pelo sensor e interpretado em função da velocidade dessas partículas

(que se considera igual à velocidade do fluido). Uma das desvantagens do ADV é o facto de fornecer informações de velocidade apenas num ponto (medição pontual).

Por outro lado, o *Acoustic Doppler Corrent Profiler* (ADCP) é um equipamento que permite medir um perfil vertical de velocidades, a batimetria e, através do método secção-velocidade, estimar caudais numa determinada secção, Figura 2.6. Sendo um equipamento de medição acústico, consistirá num emissor que transmite ondas sonoras através da água e num recetor que avaliará a reflexão provocada nas partículas existentes no escoamento.

Quando as partículas se afastam do local o som refletido terá uma menor frequência, quando as partículas se aproximam o som terá uma maior frequência. A esta mudança de frequência do sinal transmitido chama-se efeito *doppler*, que é causada pelo movimento das partículas em suspensão. Na água estão presentes diversas partículas que se deslocam à velocidade da corrente. A partir da diferença de frequências emitidas e recebidas é possível levantar o perfil de velocidades.



Figura 2.6 – ADCP (modelo: StreamProADCP adaptada de <https://frontierprecision.com/>).

O aparelho terá de ser movido perpendicularmente à corrente do rio com direção constante. A performance das medições está relacionada com a sua operação. Se o rio for de pequenas dimensões o aparelho pode ser guiado por uma pessoa de uma margem a outra (através de cabos ou cordas por exemplo), se o rio for de grandes dimensões esta operação terá de ser realizada de barco.

O ADCP regista a velocidade de corrente em diversos níveis de profundidade, tendo um alcance máximo, para alguns modelos, de até 1000 m. Todavia, a eficácia pode ser afetada se o aparelho for usado em águas muito claras, com pouco material em suspensão, se existir turbulência na secção do rio e se a profundidade do curso de água for muito baixa.

2.4 Velocimetria de Imagens de Partículas em Grande Escala

2.4.1 Velocimetria de imagens de partículas

A Velocimetria de imagem de partículas (PIV, referindo-se ao acrónimo do termo em inglês *Particle Image Velocimetry*) é uma poderosa técnica de análise do campo de velocidades de escoamento com alta precisão. Além disso, o PIV é uma técnica não intrusiva, não sendo necessária a introdução de qualquer equipamento no escoamento. Para aplicar este método é necessária uma câmara, um laser de alta potência e partículas artificiais que estejam solidárias com o escoamento. A partir deste método é possível medir as distribuições das velocidades instantâneas bidimensionais. O PIV foi criado inicialmente para resolver problemas de situações em que os instrumentos de medição não podem ser implantados devido às pequenas profundidades do curso de água. Sendo uma forma de medição que requer condições especiais de iluminação e grande tratamento de dados, o PIV é utilizado maioritariamente em laboratório, não sendo adequado para utilização em cursos de água de grandes vazões ou quando a visibilidade do caudal é reduzida.

A Velocimetria de Imagem de Partículas em Grande Escala (LSPIV, referindo-se ao acrónimo do termo em inglês *Large Scale Particle Image Velocimetry*) também é uma técnica não intrusiva utilizada para medir velocidades instantâneas de superfície livre. Esta técnica recorre ao mesmo conceito que o PIV, mas pode ser utilizada em grande escala. A grande diferença entre os dois procedimentos está nos métodos de iluminação e de captação de imagem. Geralmente, o PIV usa câmaras de alta velocidade, enquanto, o LSPIV pode utilizar câmaras comuns, para além de não ser necessária uma fonte de luz laser para a iluminação das partículas. Portanto, a LSPIV tem vantagens em relação ao PIV, por conseguir ser utilizado em mais situações resultando num método mais prático. Por outro lado, o PIV tem uma definição e frequência de aquisição superior, especialmente útil para estudos de turbulência.

Os primeiros ensaios de velocimetria de imagem em rios foram feitos no Japão em meados dos anos 90 (Fujita e Komura, 1994; Aya et al., 1995; Fujita et al., 1997). Fujita et al. (1998) introduziu o conceito de LSPIV como uma extensão do PIV para grandes áreas de escoamento em condições de laboratório e de campo. O autor identificou como limitações em relação ao uso dos métodos visuais, as reflexões causadas pelo sol (ou luz artificial no laboratório) e a existência de ondas estacionárias que limitam a utilização do método.

Embora os algoritmos de processamento de imagem e dados sejam semelhantes aos usados no PIV convencional (cf. subcapítulo seguinte), são necessários ajustes para iluminação, propagação e pré-processamento das imagens gravadas. Para a utilização de LSPIV, a água deverá possuir traçadores que possam ser facilmente identificados durante o tratamento de imagem. Estes se possuírem um tamanho adequado irão dispersar e seguir com precisão o escoamento podendo ser considerados elementos representativos do escoamento. De forma a determinar a velocidade instantânea superficial, é necessário conhecer as propriedades do aparelho em que o vídeo foi captado, nomeadamente o número de imagens por unidade de tempo (*frame rate*). De seguida, observa-se duas imagens consecutivas e verifica-se qual o deslocamento de cada partícula, de uma imagem para a outra. O vetor de deslocamento dividido pelo intervalo de tempo entre imagens origina um vetor de

velocidade superficial. Esses vetores de velocidade, quando tomados por toda a área da imagem, fornecem um mapa vetorial de velocidade, bidimensional, que representa o campo de velocidades na superfície do escoamento dentro da área em análise.

2.4.2 Processamento de Imagem

Uma vez realizada a gravação do escoamento em estudo, as imagens retiradas do vídeo (*frames*) têm de ser processadas de modo a melhorar a sua qualidade e a identificar os traçadores presentes no escoamento. Para isso, é conveniente filtrar as imagens obtidas de modo a torná-las mais visíveis e “destacadas”, facilitando assim o resto do processamento. Para determinar o deslocamento dos marcadores entre duas imagens o LSPIV usa um método estatístico de correlação cruzada.

Em essência, a correlação cruzada é uma técnica de correspondência de padrões estatísticos que tenta encontrar o padrão da partícula na área de interrogação *A* de volta na área de interrogação *B* (Thielicke & Stamhuis, 2014). A área de interrogação *A* corresponde a área de interrogação de uma imagem e a *B* corresponde à área de interrogação da imagem que lhe sucede.

Inicialmente, é necessário definir uma área de interrogação (*IA*). De forma sucinta, esta área de interrogação vai dividir as imagens em áreas de interrogação do tamanho escolhido, para que depois seja possível localizar o seu movimento numa sucessão de imagens, Figura 2.7a). De modo a que isto seja exequível, é necessário ainda definir uma área de procura (*SA*) que deverá englobar a área de interrogação e corresponderá à zona onde serão procurados os traçadores na imagem consecutiva, Figura 2.7c). A análise estatística de correlação cruzada, equação 2.8, é realizada para determinar o deslocamento dos traçadores. Num par de imagens consecutivas, o pixel com um índice de similaridade superior é assumido como maior probabilidade de deslocamento. O processo será aplicado para todas as áreas de interrogação.

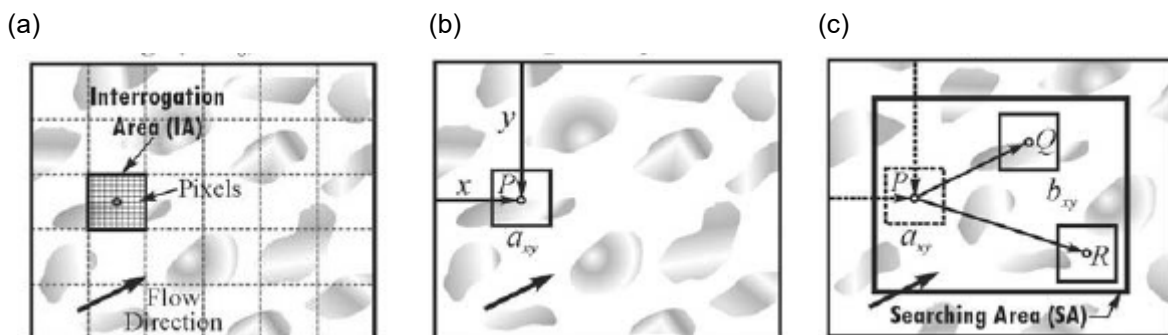


Figura 2.7 – (a) Divisão da imagem em áreas de interrogação ($t = t_0$); (b) Seleção de uma área de interrogação na primeira imagem ($t = t_0$) e (c) Seleção da mesma área de interrogação através do coeficiente de correlação cruzada ($t = t_0 + dt$).

(adaptada de Muste et al., 2008).

O algoritmo de velocimetria de imagem usa o coeficiente de correlação como índice de similaridade. Jodeau et al. (2018) define o coeficiente de correlação cruzada, R_{ab} , como:

$$R(a_{ij};b_{i,j}) = \frac{\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} [(A_{ij} - \bar{A}_{ij})(B_{ij} - \bar{B}_{ij})]}{\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} [(A_{ij} - \bar{A}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} (B_{ij} - \bar{B}_{ij})^2]^{1/2}} \quad (2.8)$$

Em que:

M_i e M_j – Dimensões nas direções i e j da área de interrogação;

a_{ij} – Posição da área de interrogação na primeira imagem;

b_{ij} – Posição para onde se irá deslocar na segunda imagem;

A_{ij} e B_{ij} – Distribuições das intensidades dos pixéis na área de procura do par de imagens;

\bar{A}_{ij} e \bar{B}_{ij} – Valores médios das distribuições das intensidades.

Segundo Muste et al. (2008), as variáveis, A_{ij} , B_{ij} , \bar{A}_{ij} e \bar{B}_{ij} , têm distribuições de intensidade a nível do cinzento nas duas áreas de interrogação separadas pelo intervalo de tempo dt . α'_{xy} e b'_{xy} indicam o valor médio da intensidade para a área de interrogação. Para economizar tempo de computação o método irá procurar a próxima área de interrogação apenas na área de procura indicada.

De uma forma simplificada, o método não possui a capacidade de identificar o mesmo traçador de imagem para imagem, então, é utilizado o método da correlação cruzada, para identificar o padrão de intensidade com maior probabilidade e maior índice de similaridade para definir o deslocamento de uma imagem para a outra. Ou seja, calcula-se o deslocamento mais provável (com maior correlação), num par de imagens com um intervalo de tempo definido. O método é aplicado em todas imagens e em todos os pontos da região em que se pretende descobrir a velocidade superficial.

2.5 Cálculo através da velocidade superficial

2.5.1 Cálculo através da velocidade superficial

Depois de se saber o valor do intervalo de tempo entre imagens e o deslocamento dos traçadores de uma imagem para a outra, é possível definir o vetor de velocidade superficial. Contudo, este valor de velocidade não é o representativo da velocidade de um rio/canal. Conforme referido anteriormente (e.g. Figura 2.2), a velocidade superficial corresponde aproximadamente ao valor máximo do perfil de velocidades. Desta forma, é necessário perceber a relação entre esta velocidade superficial e a velocidade média na altura. O objetivo será, assim, definir um intervalo de valores para um coeficiente C , que relaciona a velocidade superficial com a velocidade média na altura:

$$C = \frac{V_{100}}{V_h} \quad (2.9)$$

Em que:

V_{100} – Velocidade à superfície (obtido, por exemplo, através de LSPIV).

O coeficiente C pode variar com as condições de escoamento e do canal ou rio, nomeadamente com:

- Rugosidade lateral e de fundo;
- Raio Hidráulico;
- Número de Froude;
- Vento;
- Secção de escoamento.

Kim (2006) identificou 27 fontes de erro que afetam as medições de velocidade com LSPIV das quais as principais estão relacionadas com a ação do vento, a inclinação do curso de água, a distorção da perspetiva da imagem e a sua qualidade, a iluminação existente no local e ainda a precisão do processamento de imagem.

De forma a encontrar um intervalo de valores que delimite o coeficiente, Polatel (2005) realizou ensaios laboratoriais e, dependendo das condições de escoamento, obteve valores para o coeficiente C entre 0.789 e 0.928. Concluiu também que o valor do coeficiente é maior para leitos com menor rugosidade e maior profundidade.

A partir de ensaios laboratoriais, Hauet et al. (2018) concluiu a existência de uma relação entre o coeficiente C e a altura de escoamento. De acordo com o autor, para águas pouco profundas, Raio Hidráulico (R_h), definido como a relação entre a área de escoamento e o perímetro molhado, inferior a 1 m, o coeficiente C está perto de 0,8, aumentando linearmente para 0,9 para valores de R_h de 5 m. Em relação à influência da rugosidade do solo do curso de água, Hauet et al. (2018) conclui que o valor médio de C é 0,8 para rios naturais (rios com areias ou seixos) e 0,9 para canais artificiais de betão.

Kim (2006) estudou as incertezas associadas à medição LSPIV em condições de campo adversas (e.g. baixa visibilidade) obtendo um erro médio total na estimativa de velocidade de 10% e um erro máximo de 35%. Comparações de velocidades obtidas com LSPIV em condições de campo e velocímetros acústicos *Doppler* nos mesmos pontos apresentou diferenças de até 10% (Muste et al., 2004). As mesmas comparações contra outros aparelhos medidores de caudal mostraram uma diferença de 16% (Bradley et al., 2002).

2.5.2 Veículo aéreo não tripulado (UAV, Veículos aéreos não tripulados)

O aparecimento dos veículos aéreos não tripulados (ou drones) possibilitou melhorar o posicionamento da câmara de filmagem. Esta deixou de estar situada numa das margens (com a necessidade de efetuar a orto retificação), e passou a poder localizar-se num eixo ótico vertical à direção do movimento de água. O aparecimento dos drones trouxe uma liberdade de filmagem muito mais vasta. Antes deste aparelho, para as filmagens serem efetuadas num plano semelhante teriam de ser realizadas a partir de pontes ou de algum edifício alto perto do local. Os drones não só permitem

uma filmagem vertical como possibilitam escolher as secções do rio mais favoráveis e realizar a gravação com a altura mais adequada. Desta forma, a probabilidade de se obter uma velocidade superficial correta é maior.

Para realizar as filmagens, a qualidade do drone é um fator importante pois é necessário que haja estabilidade no decorrer das gravações, de forma a não diminuir a qualidade de imagem.

2.5.3 Traçadores

Para facilitar a identificação de partículas que se deslocam com o escoamento, numa sucessão de imagens, são usados traçadores. Estes devem possuir as características adequadas de forma a seguir a corrente com precisão, permitindo que o cálculo da velocidade superficial esteja mais próximo do correto. Para tal, é necessário que a densidade dos traçadores seja inferior à da água de modo a permitir a sua fluutuabilidade. Além disso, estes devem ser fáceis de distinguir do meio em que estão inseridos e das restantes impurezas existentes, deverão ser baratos e fáceis de adquirir pois no geral são perdidos durante ou após os ensaios. Como em algumas situações não é possível recuperar os traçadores utilizados estes devem também ser biodegradáveis ou não poluentes de modo a preservar o meio ambiente.

Relativamente ao tamanho dos traçadores, a partir de ensaios em laboratório e em campo, Chen (2018), concluiu que estes devem ser quadrangulares e devem possuir de lado 3.80% a 6.33% da largura média do curso de água. Concluiu também que, traçadores muito pequenos acabam por se agrupar e andar à deriva em conjunto, devido a tensão superficial da água e traçadores de grandes dimensões, não são eficazes pois dão velocidades superficiais inferiores às reais devido ao seu tamanho.

De uma forma geral, para escolher um traçador é necessário ter em conta o seu tamanho, a cor, a sua densidade, a velocidade superficial esperada do curso de água e o peso volúmico da água.

2.5.4 Captação de imagem

O USGS (2018) estudaram a possibilidade de usar a LSPIV para medir descargas em rios. As mesmas entidades definiram diretrizes de modo a obter os melhores resultados aquando da medição de velocidades superficiais usando a LSPIV.

Mais uma vez é reforçado que não é necessário o uso de câmaras muito sofisticadas. Estas deverão ter uma resolução no mínimo de 640x480 pixéis e devem conseguir captar um vídeo em que seja possível extrair, no mínimo, 15 *frames* por segundo. Se se verificar grandes velocidades no curso de água em estudo, deve-se utilizar uma câmara com maior resolução e frequência de aquisição. A gravação do vídeo deverá ter uma duração de pelo menos 1 minuto, isto para poder ser escolhido o melhor período da filmagem. Vídeos de maior duração permitem escolher os momentos em que o drone se encontra mais estável e a distribuição de traçadores é de maior qualidade. Devem ser incluídos no mínimo quatro pontos fixos de referência, de modo a que as distâncias possam ser facilmente conhecidas. Por fim, devem evitar-se sombras, reflexões ou massas de água que reflitam bastante a luz solar, pois isto pode comprometer os resultados.

2.5.5 Cálculo do Caudal

De modo a utilizar o LSPIV na obtenção do caudal de um curso de água, deverá ser utilizado o método da secção velocidade. Conforme referido anteriormente, o método baseia-se no produto da velocidade média do leito pela sua secção transversal. Para se obterem resultados mais precisos a secção transversal será dividida em várias partes ao longo da sua largura, Figura 2.8. Genç et al. (2015) refere que as verticais devem estar espaçadas de forma que, qualquer subsecção, não possua mais de 10% da descarga total. A divisão em subsecções permite obter caudais parciais para cada subsecção.

Depois de efetuadas as medições das velocidades em i pontos da secção transversal, é necessário determinar a largura de cada subsecção (b_i), equação 2.10. Os valores de X_i serão as posições onde foram feitas as medições dos perfis de velocidade em altura, X_{i+1} será a posição da medição adjacente e X_{i-1} a posição antecedente. Usando a equação 2.10, é possível determinar a largura de cada subsecção.

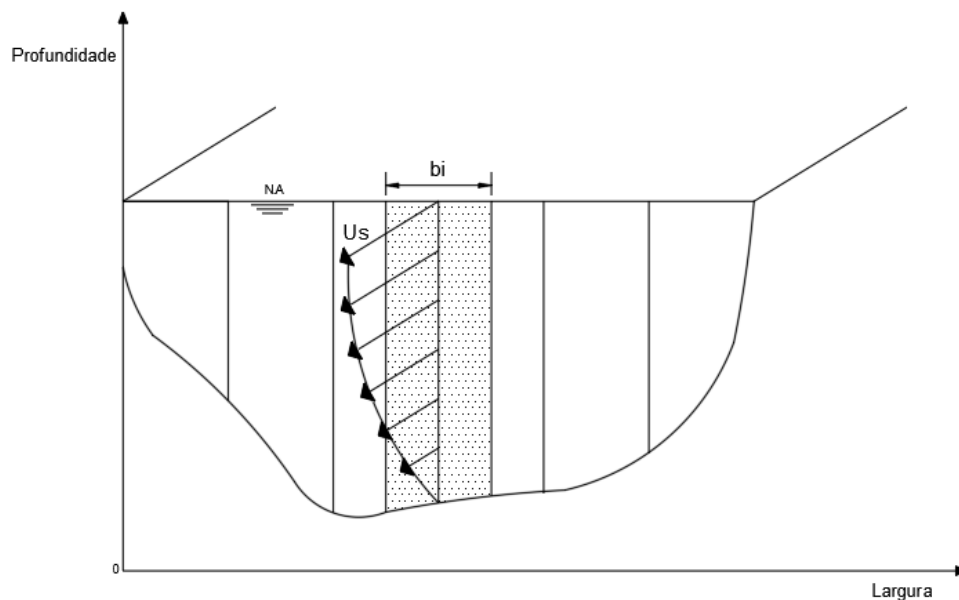


Figura 2.8 – Divisão da secção transversal e representação do perfil de velocidades.

$$b_i = \frac{(X_{i+1}) - (X_{i-1})}{2} \quad (2.10)$$

Depois de calculado b_i , é multiplicada a profundidade da subsecção obtendo-se a área da mesma. Com a área de cada subsecção, multiplica-se a respetiva velocidade média, que é dada pela equação 2.9, descobrindo-se o caudal. Por fim, é efetuado o somatório dos caudais de todas as subsecções, obtendo-se o caudal total do escoamento.

O Perfil de velocidade varia de secção para secção, mas visto em planta, geralmente, espera-se encontrar algo semelhante ao da Figura 2.9.

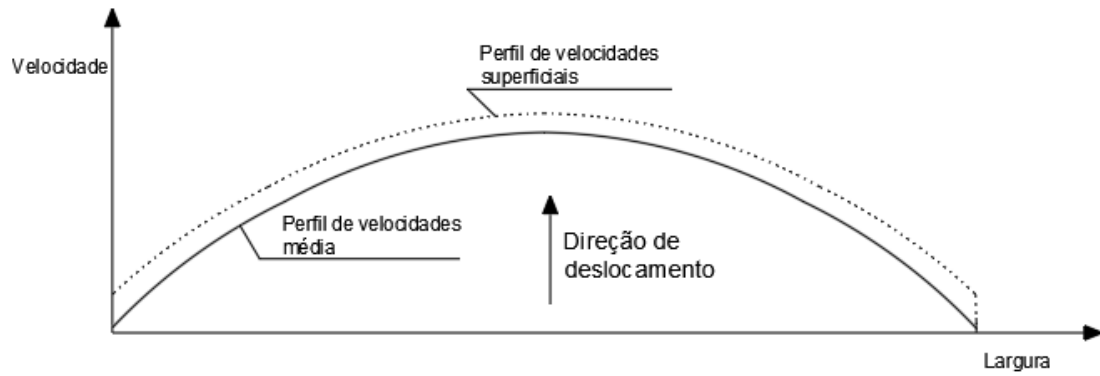


Figura 2.9 – Perfil de velocidades em planta.

De salientar que o perfil de velocidades terá a largura do escoamento em estudo e as extremidades do perfil serão as margens. A velocidade nas margens é inferior devido a rugosidade lateral existente oferecendo resistência a deslocamento da água.

3 Metodologia e ensaios realizados

3.1 Considerações gerais

A obtenção de caudais em canais ou rios através de filmagens da superfície livre do escoamento é uma tarefa com um grau de complexidade e incerteza elevado por incluir vários fatores que poderão afetar a avaliação desses caudais. Nesta dissertação foi definido um procedimento geral com várias fases de forma a responder às principais dúvidas na avaliação de caudais com o método LSPIV, tais como a escolha de traçadores ou a relação entre velocidades superficiais e velocidades médias na altura. Numa primeira fase foram efetuados ensaios em canais laboratoriais, nos quais as condições de escoamento são controladas e o caudal imposto é conhecido.

Na Figura 3.1 apresenta-se um esquema desse procedimento, com o qual se pretendeu atingir os vários objetivos propostos.

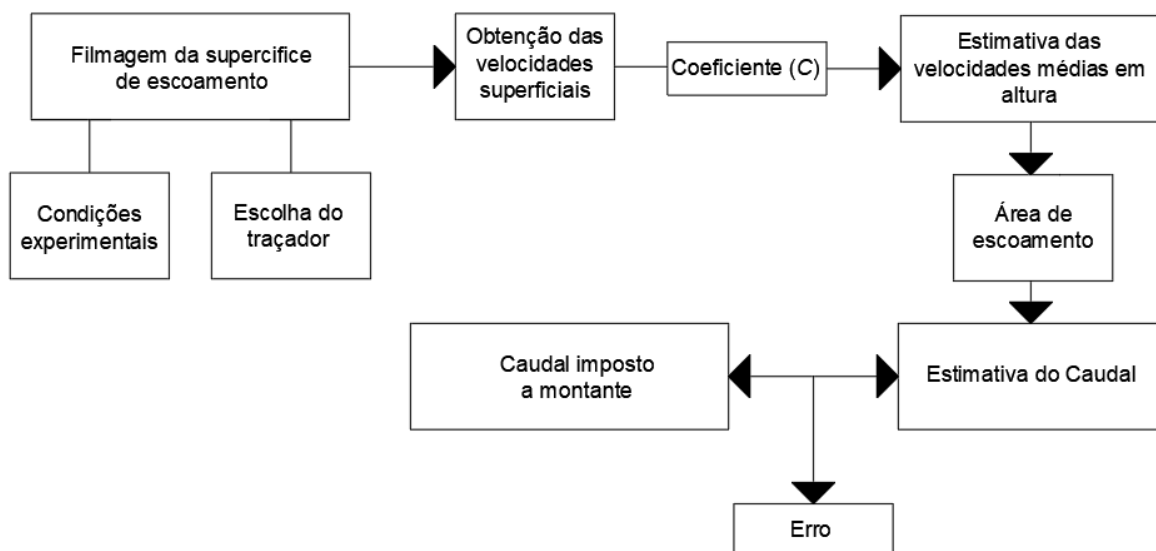


Figura 3.1 – Esquema dos passos realizados para a estimativa de caudal com o LSPIV.

Para dar início às filmagens da superfície de escoamento e obter as velocidades superficiais mais precisas e exatas possíveis é necessário ter em conta as condições de escoamento. Para permitir uma melhor definição do caudal torna-se essencial determinar as características do curso de água. É também essencial encontrar o traçador que melhor possa caracterizar o movimento superficial da água, daí ser fundamental realizar um estudo aos traçadores. O tamanho foi variado de modo a verificar se a caracterização da velocidade superficial é influenciada.

O início do estudo aos traçadores teve como base a análise referida por Chen (2018), que afirma que os traçadores devem ser quadrangulares com dimensões de lado de 3.80% a 6.33% da largura do canal.

Além da variação das secções do canal e de traçador, também serão testados dois *softwares* computacionais de análise de imagem para a obtenção de velocidades superficiais, conforme secção seguinte.

3.2 Softwares informáticos utilizados

3.2.1 Considerações gerais

Na presente dissertação, além dos programas de uso corrente em engenharia (como os *softwares* do Office ou Matlab), foram utilizados os seguintes *softwares*:

- PIVlab (Thielicke & Stamhuis, 2014)
- FUDAA (Jodeau et al., 2018)

Um dos objetivos desta dissertação passa por verificar quais os *softwares* que apresentam um nível de precisão e exatidão maior na determinação da velocidade superficial para os cursos de água estudados.

3.2.2 PIVLAB

O PIVLAB é um *software open source* de velocimetria de imagem de partículas que tira proveito de vários recursos internos do Matlab, nomeadamente da *toolbox Image Processing* (Thielicke & Stamhuis, 2014). Segundo os autores, o *software* facilita o processamento de dados permitindo calcular a distribuição de velocidades em pares de imagens.

Numa primeira fase de pré processamento o *software* permite importar uma sequência de imagens (o intervalo de tempo entre imagens tem de ser conhecido, Figura 3.2a), ou importar diretamente o vídeo do ensaio, Figura 3.2b).

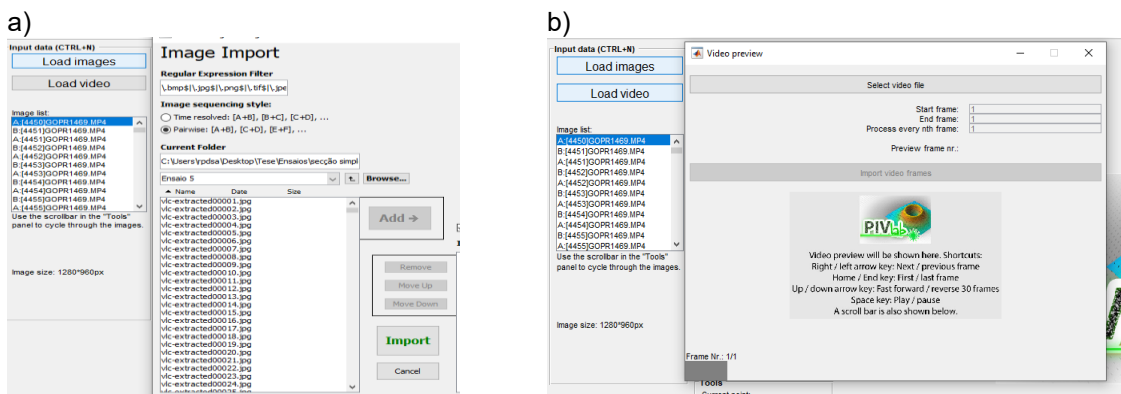


Figura 3.2 – a) Importar imagens para análise e b) importar vídeo para análise.

De seguida, é necessário definir uma região onde queremos que a análise se concentre, Figura 3.3. Adicionalmente, pode ser aplicada um “filtro” de modo a excluir certas áreas da análise, por exemplo, objetos existentes no meio da secção do rio ou reflexões que possam interferir com o processamento de imagem.

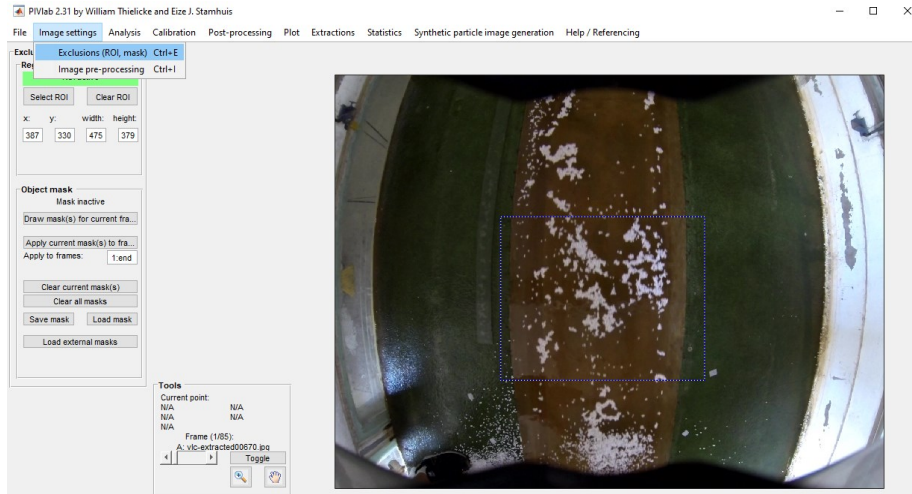


Figura 3.3 – Seleção da secção para a análise.

Ainda no pré processamento, o PIVlab permite aplicar filtros de modo a melhorar o contraste das imagens e, dessa forma, distinguir mais facilmente os traçadores e melhorar a qualidade da medição. O *software* permite aplicar os seguintes três filtros:

- (a) *Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLACHE) que melhora o contraste das imagens;
- (b) *Intensity high-pass* que serve para remover iluminação não homogênea da imagem e eliminar informações de baixa frequência;
- (c) *Intensity capping* que limita a intensidade da escala cinza de modo a eliminar partículas ou pontos brilhantes dentro da área de análise que podem influenciar a falsos resultados.

Na Figura 3.4 encontra-se a representação dos três tipos de filtros.

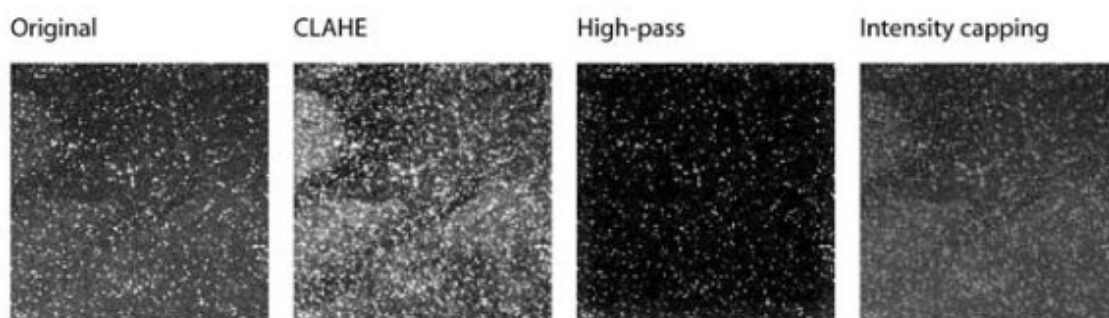


Figura 3.4 – Filtros disponíveis no *software* PIVlab.

Uma vez realizados todos os passos necessários no pré processamento, inicia-se a próxima fase onde se procede à avaliação de imagem. Uma das componentes mais complexas no processo de avaliação de imagem é a análise PIV do algoritmo de correlação cruzada.

O PIVlab permite resolver o algoritmo de correlação cruzada, equação 2.8, de três maneiras: (i) *Direct Cross Correlation* (DCC); (ii) *Fast Fourier Transform* (FFT) e (iii) Técnica de descoberta do pico. Thielicke & Stamhuis (2014) aprofundam de uma forma mais detalhada estes três métodos de cálculo. Os mesmos realizaram testes de qualidade entre *Direct Cross Correlation* e a *Fast Fourier Transform*. e revelaram que o FFT utilizando com uma deformação da janela supera o DCC básico. No *software* a DCC foi descontinuada, provavelmente devido à carga computacional exigida. Devido a isto todas as análises efetuadas com o PIVlab foram realizadas com a *Fast Fourier Transform*.

Pode-se encontrar estas três formas de calcular os deslocamentos em *Analysis*, Figura 3.5.

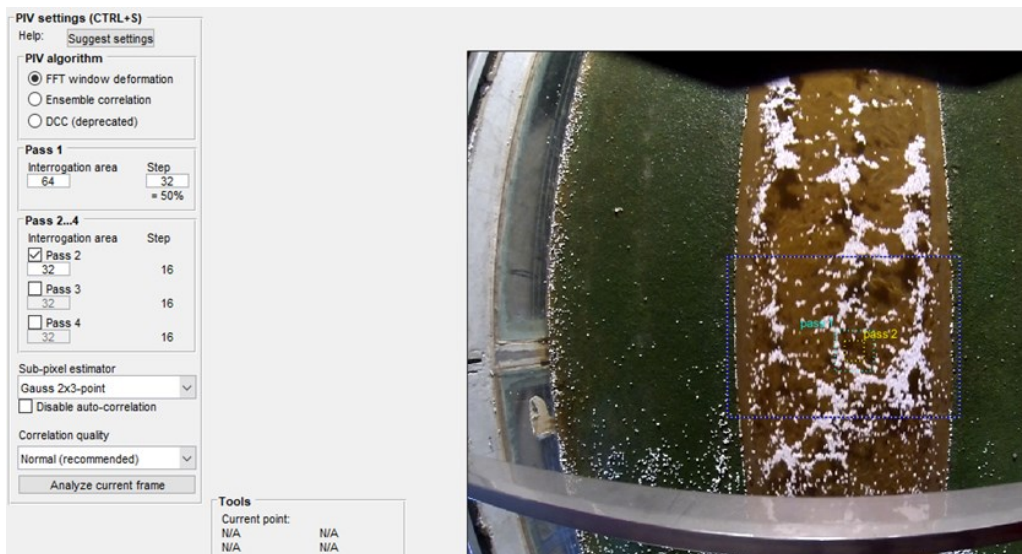


Figura 3.5 – Métodos de análise e escolha da área de interrogação no *software* PIVlab.

Concluída a análise, o PIVlab irá calibrar e converter os deslocamentos obtidos relacionando o tamanho do pixel com a distância real entre dois pontos dado pelo utilizador, em *Calibration*, Figura 3.6.



Figura 3.6 – Calibração das imagens no *software* PIVlab.

Após a calibração das imagens, segue-se o pós-processamento onde será possível eliminar resultados gerados pelo *software* que se encontram muito longe do pretendido (*outliers*). O *software* calcula a média de todos os resultados de velocidade superficial obtidos criando um campo de velocidades superficiais, Figura 3.7. Em *Extractions* é possível desenhar uma linha perpendicular à direção escoamento onde serão fornecidos os valores de velocidade superficial no número de pontos pretendidos.

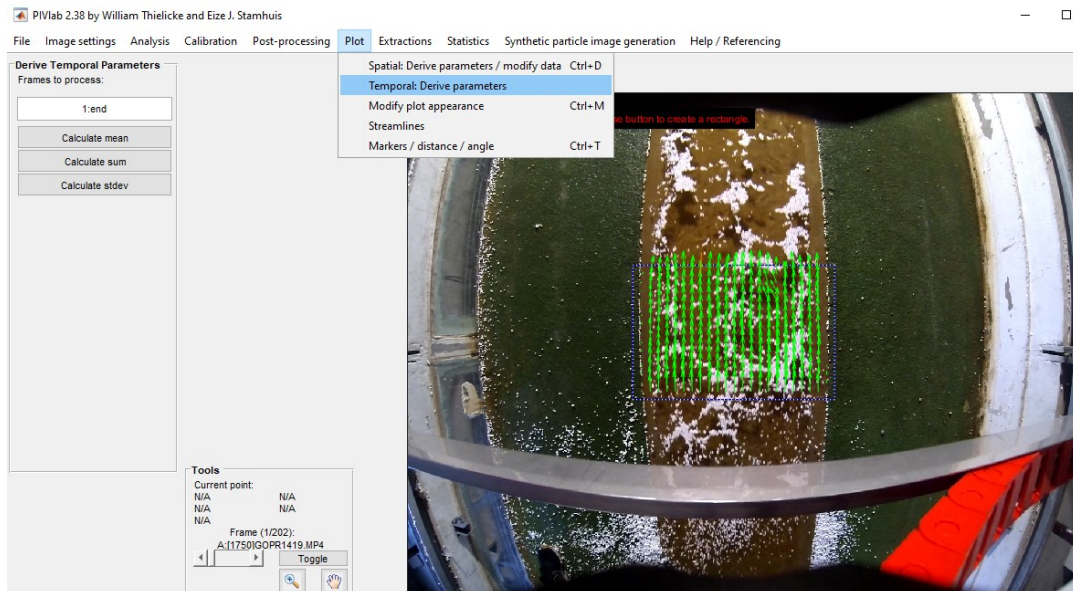


Figura 3.7 – Campo de velocidades superficiais no *software* de análise PIVlab.

3.2.3 FUDAA

Criado por Jodeau et al. (2018), o Fudaa-LSPIV é uma interface Java que utiliza executáveis Fortran. O desenvolvimento de Fudaa-LSPIV foi executado pela DeltaCAD desde agosto de 2010 com financiamento e sob a direção da EDF (Électricité de France) e da Irstea. O Fudaa é outro dos *softwares* utilizados para processar uma sequência de imagens da superfície do escoamento, permitindo assim, calcular o campo de velocidade de superficial e conseqüentemente o caudal do escoamento. O *software* baseia-se também na técnica de Velocimetria de Imagem de Partículas em Grande Escala (LSPIV).

O Fudaa, em *Images*, permite importar uma sequência de imagens ou um intervalo de tempo de um vídeo, Figura 3.8.

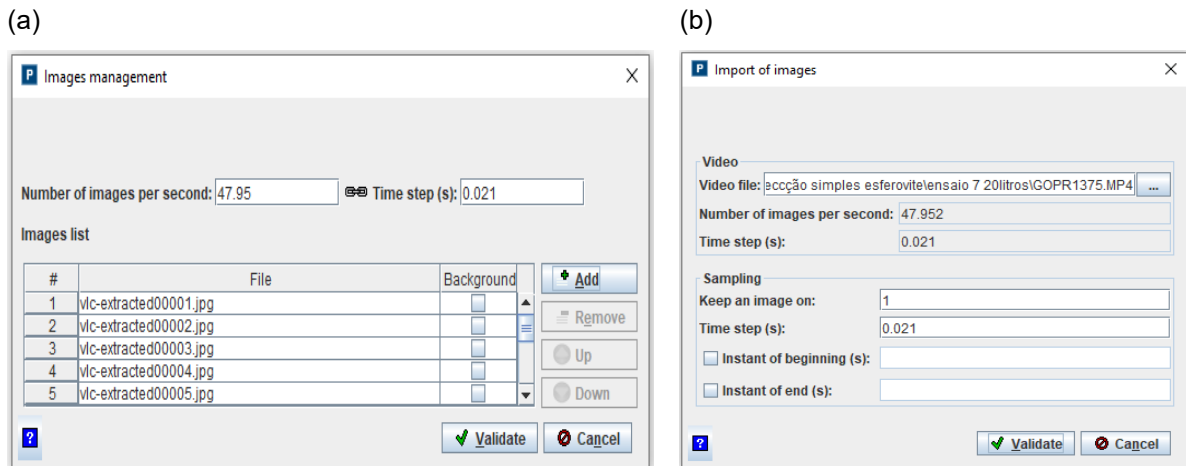


Figura 3.8 – (a) secção do *software* (*source images management*) que permite importar imagens consecutivas para análise com um intervalo de tempo conhecido e (b) secção do *software* (*import images from a vídeo*) que permite importar um vídeo para análise.

Existem dois modos possíveis para a análise de imagens no Fudaa: *complete orthorectification* ou *scaling*. O modo *complete orthorectification* é aplicado quando as imagens estão distorcidas devido à perspetiva de onde são obtidas as imagens/vídeo. Para retificar é necessário definir pelo menos 4 ou 6 pontos não alinhados (dependendo se se pretende uma análise em 2D ou em 3D) no terreno, com coordenadas conhecidas, Figura 3.9a).

Caso a captura de imagens seja feita a partir de um ponto de vista vertical ao rio o modo utilizado é o “*scaling*”, assim é possível desprezar efeitos de perspetiva. Este modo serve para especificar o tamanho de cada pixel, Figura 3.9b). Para o analisar é necessário conhecer pelo menos dois pontos para o programa realizar a conversão para pixels.

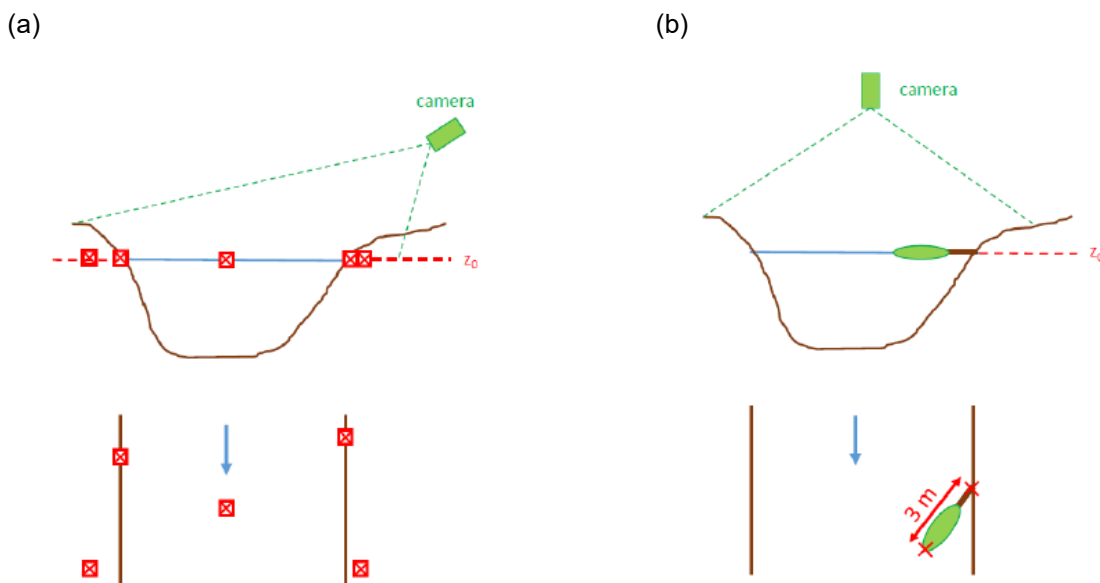


Figura 3.9 – Perspetiva de onde é obtida a captura de imagens em (a) *complete orthorectification* e em (b) *scaling* (adaptado de Jodeau et al., 2018).

Após a orto retificação das imagens é possível passar então para a análise PIV, onde são calculadas as velocidades superficiais a partir da análise estatística de movimento do traçador utilizado.

Em relação aos marcadores utilizados, conforme anteriormente referido, o LSPIV usa um método estatístico de correlação cruzada em imagens para determinar o deslocamento dos marcadores visíveis na superfície, Figura 3.10. O índice de similaridade para padrões incluídos numa pequena área de interrogação (*IA*) fixada na primeira imagem é calculado para a mesma área de interrogação dentro de uma área de pesquisa maior (*SA*) selecionada na segunda imagem. O ponto, no par de imagens, com o valor máximo para o índice de similaridade é considerado o deslocamento mais provável. Uma vez conhecido o deslocamento, a velocidade pode ser calculada dividindo-a pela diferença de tempo entre imagens, Figura 3.11.

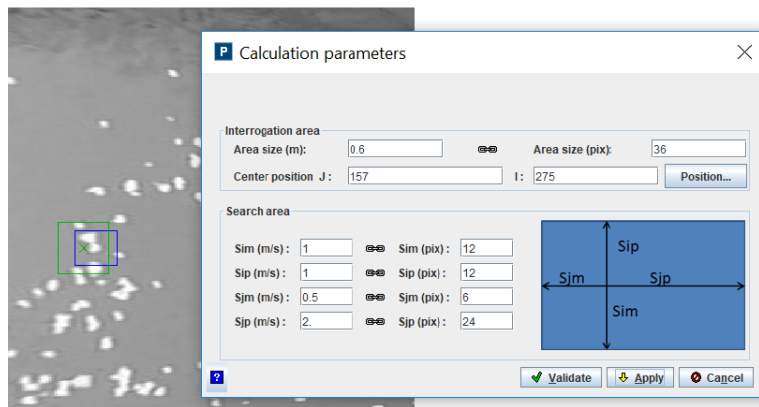


Figura 3.10 – Parâmetros para definir a área de interrogação e a área de procura (adaptado de Jodeau et al., 2018).

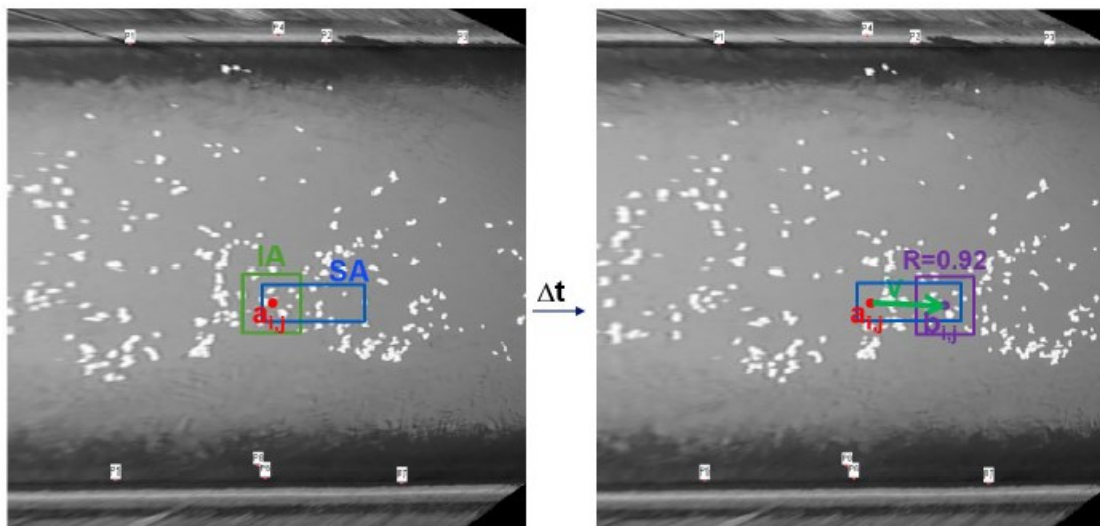


Figura 3.11 – Exemplo da movimentação das áreas de interrogação e de procura no cálculo das velocidades superficiais (adaptado de Jodeau et al., 2018).

O pós-processamento é semelhante ao do PIVlab pois é possível filtrar os resultados da velocidade, em *Post-processing -> instantaneous results filtering*. Contudo no PIVlab é possível aplicar uma maior variedade de filtros enquanto no Fudaa apenas é aplicado um. A principal diferença no pós-processamento entre o Fudaa e o PIVlab consiste no facto do Fudaa permitir retirar todos os valores de velocidade na secção em análise e não só os valores que intersejam as linhas desenhadas. Para obter apenas as velocidades superficiais é necessário seleccionar *Average res. vel.*, ir a *2D view* e escolher a opção *Values table*, Figura 3.12. De salientar que as velocidades médias apresentadas são a média de todos os resultados de velocidade superficial provenientes de cada imagem analisada.

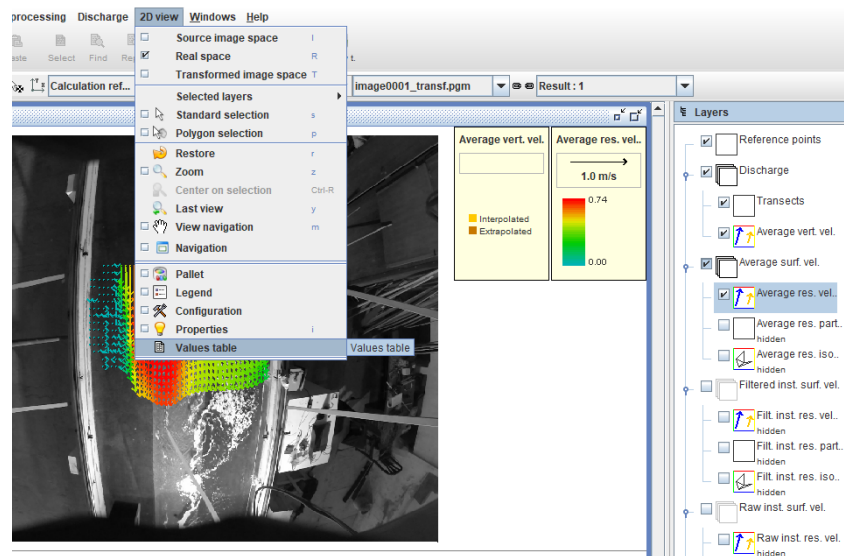


Figura 3.12 – Exemplo de como obter o campo de velocidades superficiais no Fudaa.

Após todos estes passos, o *software* permite definir o coeficiente necessário a aplicar às velocidades superficiais e assim calcular o caudal, em *Discharge*. Isto só é possível para os casos em que são conhecidos dados acerca da batimetria do curso de água em estudo.

3.3 Metodologia para análise aos traçadores

Inicialmente foi efetuada uma análise aos traçadores, de forma a descobrir aquele que melhor caracteriza a velocidade superficial da água. Para isso, foram tidos em conta dois fatores: o padrão de velocidades superficiais obtido pelos *softwares* de análise de imagem e o erro obtido no caudal estimado, quando aplicado um coeficiente teórico para a relação entre as velocidades superficiais e a velocidade média na altura.

Na análise dos traçadores em cada secção, utilizou-se diferentes tamanhos dos mesmos e apenas um único caudal. De forma a facilitar o critério de decisão nesta primeira análise, e por este fornecer resultados de uma forma mais expedita que o Fudaa, recorreu-se apenas a um *software* no cálculo das velocidades superficiais, o PIVlab.

Para verificar se o perfil de velocidades superficiais adquirido com o método LSPIV é aceitável, este será comparado com as velocidades médias provenientes de um aparelho tradicional de medição

de velocidades, o ADV. Para calcular o erro será aplicado um coeficiente teórico (de encontro com o enquadramento teórico) às velocidades superficiais obtidas, de forma a obter as velocidades médias em altura. Com a integração das velocidades médias, obtidas com o LSPIV depois de aplicado o coeficiente teórico, em toda a secção é obtido o caudal teórico. O caudal obtido a partir deste coeficiente teórico é comparado ao caudal imposto a montante sendo verificado o erro associado.

3.4 Metodologia para análise dos programas de LSPIV

Depois de escolhido o melhor traçador a utilizar em cada secção, foram variados os caudais, sendo a análise de velocidades feita em ambos os *softwares* de LSPIV. Com as velocidades superficiais calculadas e com a área da secção de cada escoamento é novamente possível determinar o caudal. Nesta segunda análise não irá ser só utilizado o coeficiente teórico para calcular o caudal. O valor do coeficiente será variado de forma que o caudal estimado seja igual ao caudal imposto a montante. O objetivo é obter um coeficiente prático exclusivo para cada caso de estudo. O *software* que apresentar valores de coeficientes mais coerentes, mais próximos do enquadramento teórico e perfis de velocidade mais semelhantes aos obtidos com o ADV, será considerado o *software* que melhor permite estimar as velocidades superficiais.

3.5 Ensaios laboratoriais

Para aplicar todos os fatores enunciados, foram realizados ensaios em três canais laboratoriais com diferentes características. As instalações serão apresentadas em detalhe na secção seguinte, juntamente com os procedimentos experimentais utilizados. De uma forma resumida, os ensaios envolveram as seguintes partes:

a) Parte A: Secção simples trapezoidal

A análise no primeiro ensaio é feita num único *software* – o PIVlab –, e é testado para um único caudal de 20l/s dois tipos de traçadores. O objetivo deste ensaio (A1) é determinar qual o melhor traçador para esta secção. Como já foi referido, entre os dois *softwares* de análise de velocidades superficiais, o PIVlab é o mais rápido a fornecer valores, por isso recorreu-se apenas a este *software* na primeira fase do estudo.

Após determinar o traçador que melhor caracteriza o escoamento na secção simples é realizado um segundo ensaio (A2), onde são testados quatro caudais e dois *softwares* de análise de dados. O propósito é perceber que propriedades fazem variar o coeficiente e saber qual dos dois *softwares* produz resultados mais exatos e precisos.

b) Parte B: Secção composta

Nesta secção foram efetuados dois ensaios numa secção composta: B1 e B2. No primeiro foi testado um único caudal de 58,9 l/s e um único *software*, o PIVlab (pois fornece resultados mais rapidamente), fazendo-se variar três traçadores. O objetivo é determinar qual o melhor traçador para esta secção. No ensaio B2 foram testados três caudais e dois *softwares* com o traçador que forneceu melhores resultados no ensaio B1. O propósito deste ensaio é também

perceber que propriedades fazem variar o coeficiente e saber qual dos dois *softwares* produz resultados mais exatos e precisos.

c) Parte C: Secção simples retangular.

Nesta secção não foi possível realizar medições com o ADV, portanto foi efetuado apenas um ensaio onde foi somente comparado o caudal imposto a montante com o caudal obtido com o LSPIV. O objetivo do ensaio baseou-se em comparar os perfis de velocidade com a outra secção simples e verificar se diferentes propriedades de escoamento resultam num coeficiente diferente.

3.6 Ensaio de campo

Após a análise dos resultados obtidos nos canais laboratoriais, e assimilando as principais conclusões dessa análise, foram efetuadas medições de velocidade num canal com uma dimensão semelhante a uma pequena linha de água (cerca de 10 m de largura e 1 m de altura de escoamento).

Este curso de água foi escolhido por causa da sua localização e devido às suas características de escoamento serem parecidas às estudadas em laboratório.

O objetivo prende-se em verificar se as condições laboratoriais são mantidas para condições a uma escala superior e também para perceber se é possível relacionar os resultados obtidos em campo com os resultados conseguidos em laboratório. Por último, pretende-se também estudar a eficácia de medição do método LSPIV comparativamente ao ADCP.

Na Figura 3.13 é apresentado um esquema resumido de todos os ensaios efetuados na presente dissertação de maneira a comprovar o método LSPIV.

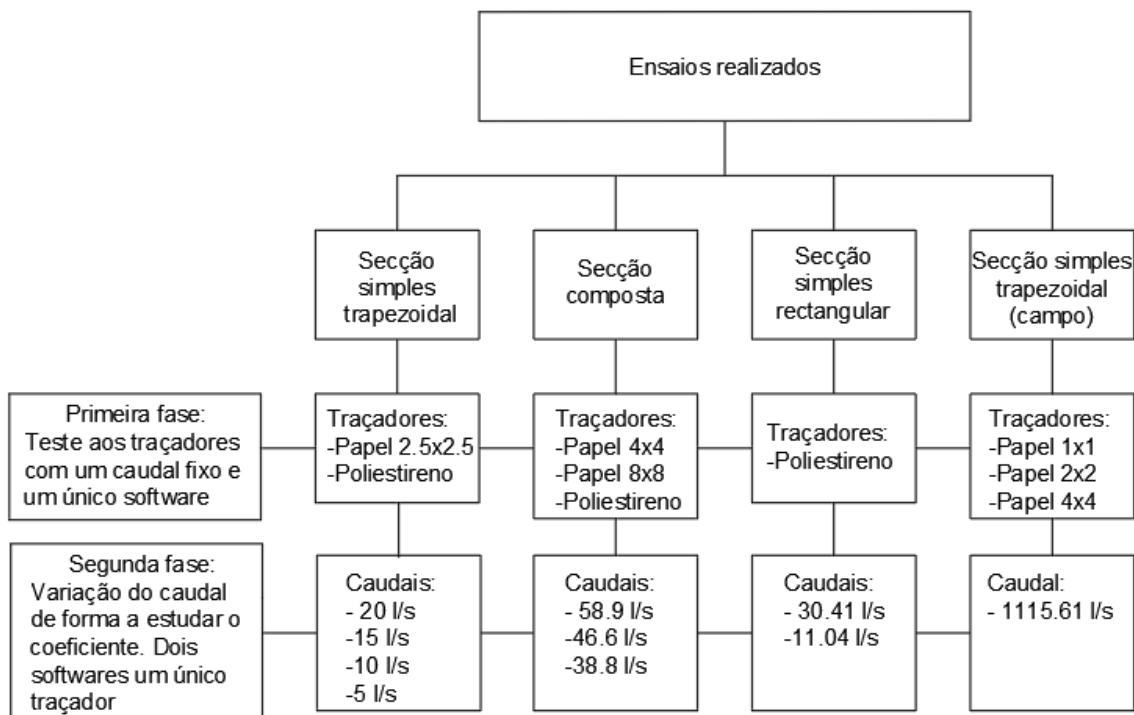


Figura 3.13 – Esquema de todos os ensaios realizados na dissertação

4 Procedimento experimental

4.1 Instalações laboratoriais

Conforme referido anteriormente, os ensaios laboratoriais foram a principal via seguida para se atingir os vários objetivos a que este trabalho se propõe. Esses ensaios tiveram lugar em diversos canais do Pavilhão de Hidráulica Fluvial e Hidráulica das Estruturas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Inicialmente foram realizados ensaios num canal de secção composta com aproximadamente 10 m de comprimento e 2 m de largura. A secção transversal é simétrica e é formada por um leito principal com 0.4 m de rasto e dois leitos de cheia com 0.7 m de largura. O leito principal tem uma profundidade de 0.1 m e a transição entre leitos é feita por margens com inclinação de 45° conforme representado na Figura 4.1. Longitudinalmente, o canal tem um declive de 1.10×10^{-3} m/m.

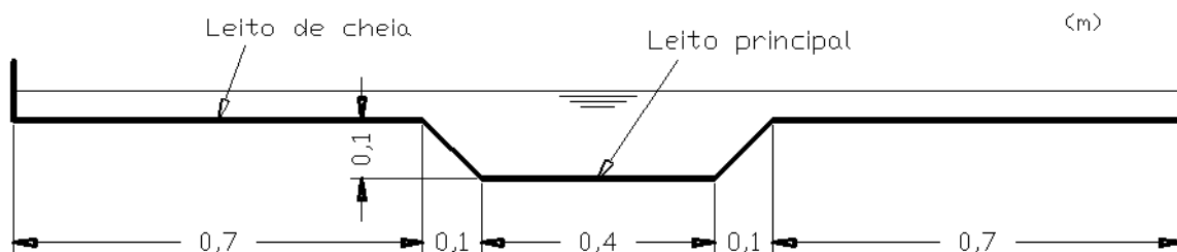


Figura 4.1 – Secção transversal do canal de secção composta.

Neste canal, os ensaios foram realizados considerando duas configurações simétricas diferentes, nomeadamente utilizando:

- (i) Apenas o leito principal trapezoidal com base 0.4 m e margens com inclinação 1:1 (Parte A, referida em 3.5);
- (ii) O canal de secção composta compreendendo o leito principal e os leitos de cheias laterais (Parte B, referida em 3.5)

Partindo da secção simples completa, situação (i), um aumento de caudal fará a água transbordar do leito principal e ocupar os leitos de cheia laterais, ambos com 0.7 m de largura. Quando a água ocupar esses leitos de cheia estamos perante uma configuração em canal de secção composta, Figura 4.2a). A alimentação de água compreende duas entradas de água separadas para o leito principal e para os leitos de cheia. Essa separação na alimentação de caudais aos vários leitos é relevante para a redução de comprimento necessário para a obtenção de regime de escoamento uniforme ao longo do canal (cf. Bousmar et al., 2005). Para cada entrada o caudal é controlado através de uma válvula ligada a um medidor de caudal eletromagnético com uma precisão de ± 0.1 l/s. A jusante, o canal está equipado com comportas independentes para cada uma das subsecções (leito

principal e dois leitos de cheias) com a função de ajustar a altura de água em todo o canal (o escoamento será efetuado em regime lento, logo controlado por jusante).

Aproveitou-se a secção central do leito de principal para simular um canal de secção simples de forma a obter mais um caso de estudo e possibilitar a análise de uma secção com características diferentes, Figura 4.2b).

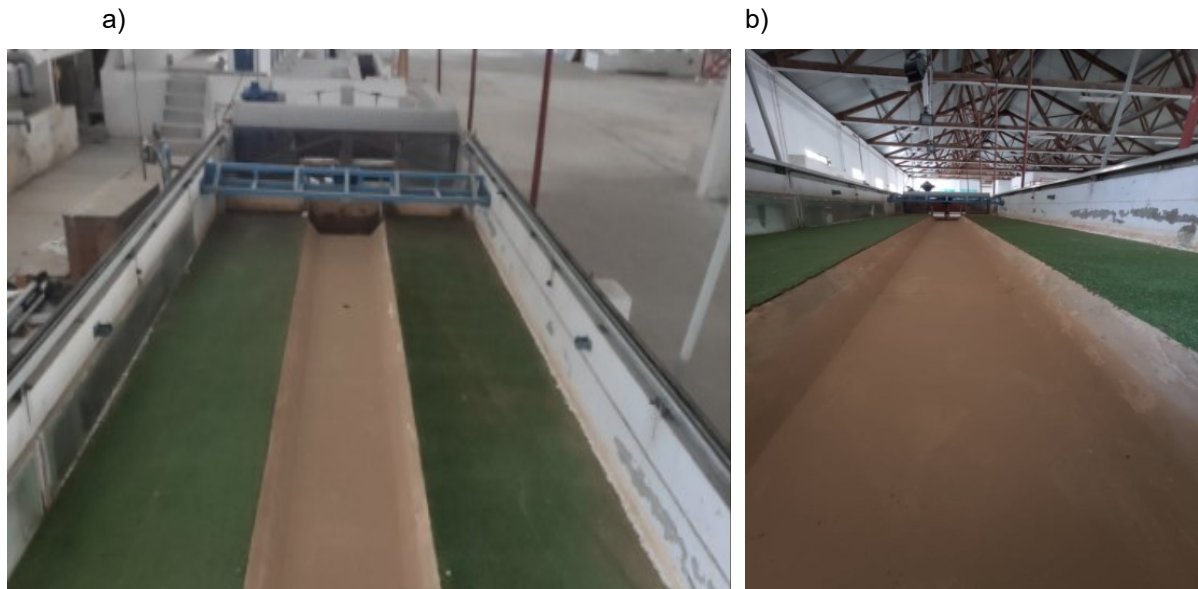
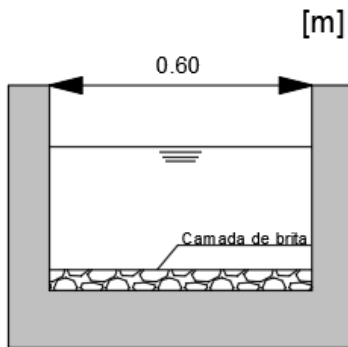


Figura 4.2 – a) Fotografia da secção composta analisada e b) Fotografia da secção central da secção composta simulando uma secção simples.

Como já foi referido anteriormente, para realizar uma terceira análise foi aproveitada uma secção simples retangular de um ensaio relativo às dimensões de cavidades de erosão provocadas por um jato livre mergulhante, bidimensional, num leito aluvionar situado a jusante de uma soleira delgada de tipo Bazin. A secção onde foram efetuados os ensaios referentes ao LSPIV situa-se na parte final do canal que serve apenas para conduzir a água para o reservatório, ou seja, a água não sofre qualquer tipo de perturbação relativamente ao ensaio das dimensões de cavidades de erosão provocadas por o jato livre mergulhante. Esta secção é prismática, tem cerca 5 m de comprimento por 0.60 m de largura e um solo de escoamento composto por uma camada fina de brita, Figura 4.3.

a)



b)



Figura 4.3 – a) Representação da secção transversal e b) Fotografia em planta do canal.

A água chega a esta secção proveniente de um descarregador de Bazin, o que permite calcular o caudal que é imposto. A montante do descarregador instalou-se um hidrómetro de ponta direita para medição da cota da superfície livre e, por essa via, do caudal. Esse hidrómetro está montado numa secção situada a cerca de 1.3 m a montante do descarregador. Segundo Quintela (1981), se a secção de medição da cota da superfície livre se situar a uma distância do descarregador não inferior a 4 a 5 vezes da carga máxima de funcionamento o caudal pode ser calculado pela expressão seguinte:

$$Q = \zeta b \sqrt{2g} h_0^{3/2} \quad (4.1)$$

Em que:

- ζ Coeficiente de vazão do descarregador;
- b Largura do descarregador;
- g Aceleração da gravidade;
- h_0 Distância desde o nível da água até ao topo do descarregador.

As condições de validade da equação anterior ($0.025 \text{ m} < h_0 < 0.80 \text{ m}$, $z > 0.30 \text{ m}$ e $z < h_0$) foram sempre verificadas, onde z é a altura a que o descarregador se encontra.

Existem diversas fórmulas para a obtenção do coeficiente de vazão do descarregador, ζ , entre as quais se transcreve a utilizada:

$$\zeta = 0.410 \left(1 + \frac{1}{1000h_0 + 1.6} \right) \left[1 + 0.5 \left(\frac{h_0}{h_0 + z} \right) \right]^2 \quad (4.2)$$

As medições de h_0 efetuadas no decorrer das experiências foram igualmente realizadas com hidrómetros de ponta direita, sendo a sua precisão igual a 0.1 mm. No entanto, face às oscilações da superfície livre existentes, estima-se que os níveis foram medidos com erros de $\pm 1.0 \text{ mm}$.

4.2 Ensaios em rio/canal

Depois de efetuados os ensaios em laboratório, foram realizados ensaios em condições reais num canal no Carregado, em Alenquer – localizado $39^{\circ}00'20.6''N$ $8^{\circ}56'56.3''W$, Figura 4.4a). Este canal conduzia a água proveniente dos sistemas de refrigeração da EDP descarregando-a no Rio Tejo, Figura 4.4b). Este curso de água foi escolhido por apresentar condições bastante próximas das necessárias para realizar a análise LSPIV. Tendo em conta que este canal já não é utilizado para descarregar a água dos refrigeradores o escoamento é controlado a jusante pelo efeito das marés. Contudo, como o mesmo corre a uma velocidade relativamente lenta, caso as medições sejam executadas num curto espaço de tempo, a diferença de caudal será muito reduzida. Outro aspeto a salientar é o facto de o canal ser atravessado por uma pequena ponte facilitando a operação com o ADCP e o arremesso dos traçadores.

Em relação às propriedades físicas do curso de água a secção é trapezoidal, tem 12.5 metros de largura, 2.70 m de altura e a parede lateral um ângulo de 45° , Figura 4.5. Esta secção é bastante parecida à secção simples testada em laboratório, devido a isto será possível perceber se as conclusões aí retiradas se manterão semelhantes.

a)



b)



Figura 4.4 – a) Vista aérea, tirada do Google Maps, da área onde foram realizados os ensaios, e b) fotografia tirada no local dos ensaios.

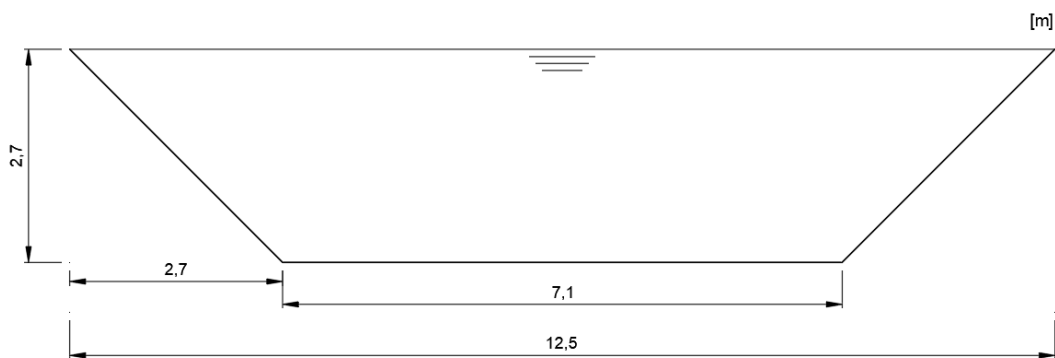


Figura 4.5 – Secção transversal do curso de água ensaiado em campo.

4.3 Equipamento utilizado

Para aplicar o método LSPIV no estudo laboratorial foram essenciais 5 elementos: canais com condições controladas, câmara, traçadores, sistema de iluminação e um computador com os *softwares* para análise de dados.

Como já foi referido, foram realizados ensaios em três canais, dois de secção simples e outro de secção composta. O material que compõe o solo da secção simples trapezoidal é betão polido. A outra secção simples analisada é retangular e é composta por betão, porém o seu solo possui uma camada superficial de brita. A secção composta é constituída também por betão polido no leito principal e relva sintética com 5 mm de altura – de forma a tentar simular a vegetação presente nos cursos de água e aumentar o atrito no leito de cheia.

A câmara utilizada nos ensaios nas instalações laboratoriais foi a GoPro 3 com uma resolução de 1280x960 pixels e uma frequência de aquisição de 47.95Hz (ou seja, 47.95 imagens por segundo).

Irão ser utilizados traçadores de poliestireno e de papel para realizar os ensaios com o método LSPIV.

De forma a comparar velocidades laboratoriais obtidas pelo LSPIV, foi utilizado um ADV Vectrino para medir as velocidades de escoamento com as seguintes características:

- Alcance máximo: 0.35 m;
- Distancia da sonda: 0.05 m;
- Faixa de velocidade: ± 4 m/s;
- Precisão $\pm 1\%$ do valor medido ± 1 mm/s;
- Custo: 9 mil euros.

Nos ensaios de campo não foi possível usar o ADV para registar velocidades. O alcance máximo do aparelho não é o suficiente para determinar a velocidade média, mas mesmo que fosse, seria necessário recorrer a um barco para percorrer a secção do escoamento e realizar as medições (a profundidade do curso de água não permite a entrada de um operador). Devido a estas condições, foi necessário recorrer a um perfilador de velocidades acústico (*Acoustic Doppler Current Profiler*, ADCP²), uma placa de XPS, de modo a segurar o ADCP à superfície da água e cordas para controlá-lo quando travessar a secção transversal do canal em estudo.

O perfilador é o *Aquadop Profiler* 1 MHz, da Nortek, e tem as seguintes características:

- Alcance máximo: 12 a 25 m;
- Espaçamento entre células: 0.1 a 4 m;
- Distância do aparelho até à primeira medição: 0.20 m;
- Número máximo de células: 128;
- Faixa de velocidade: ± 10 m / s;
- Precisão $\pm 1\%$ do valor medido $\pm 0,5$ cm / s;
- Custo: 14 a 18 mil euros.

² Na presente dissertação será utilizado o acrónimo em inglês ADCP, tendo em conta a sua utilização frequente mesmo em países não anglófilos.

Para a análise em campo com o LSPIV foi necessário um drone com uma câmara incorporada, de maneira a captar os traçadores sobre a água. O drone é o Hubsan ZINO PRO com uma definição de câmara ultra alta 4k (3840x2160) e um poder de extração de 30 imagens por segundo. Este aparelho permite no máximo 23 min de voo e consegue percorrer uma distância de 4 Km, podendo ter um custo de 300 a 500 euros.

Quanto às partículas traçadoras usadas em cada ensaio, para a secção simples trapezoidal foram testados dois tipos de materiais: papel (p. ex. folha A4) e poliestireno expandido (mais conhecido como esferovite). Como a secção simples tem uma largura de 0.6 metros foram utilizados papéis quadrangulares com 2.5 centímetros de lado, correspondendo a 4% da largura da secção.

A secção composta tem 2 metros de largura, portanto, a secção lateral dos papéis utilizados é 8 centímetros. Foi testado adicionalmente um marcador mais pequeno, de 4 centímetros. Chen (2018) tirou as suas conclusões a partir de 5 ensaios realizados em laboratório, onde foram utilizados 5 tipos de traçadores: círculos de papel com 0.7 de diâmetro, e quadrados de papel com 1, 3, 5 e 10 cm de lado. Os melhores resultados foram obtidos com os traçadores de 3 e 5 cm. O pior foi o traçador de 10 cm por fornecer valores de velocidades inferiores. Como o traçador de 8 cm é bastante grande e próximo de 10 cm considerou-se que os traçadores de 8 centímetros poderiam não representar da melhor forma as velocidades superficiais da água. Por isso, testou-se complementarmente um traçador de 4 cm, pois corresponde a 4% de metade da secção do curso de água. Para além destes dois traçadores também foi testado o poliestireno. O poliestireno foi usado em ambas as secções devido à sua densidade e à sua facilidade de lançamento o que permite garantir uma boa distribuição de traçadores em toda a secção.

Os ensaios realizados na secção simples retangular foram efetuados depois de obtidos os resultados nas restantes secções. Como o polistireno na secção simples trapezoidal gerou bons valores de velocidade superficial, na secção simples retangular foi apenas utilizado o poliestireno como traçador.

No ensaio de campo recorreu-se a 3 traçadores com diferentes dimensões. Devido ao facto do poliestireno ser mais prejudicial para o ambiente, utilizaram-se traçadores de papel quadrangulares com 1,2 e 4 cm de lado.

5 Resultados obtidos em laboratório

5.1 Secção simples trapezoidal

5.1.1 Procedimentos iniciais

Para dar início aos ensaios em laboratório é necessário tomar todas as precauções necessárias de modo a minimizar os fatores que podem levar ao erro do LSPIV.

De forma a realizar a captação de imagens colocou-se a câmara a cerca de 0.90 m de altura (desde a superfície livre do escoamento) e com o eixo ótico perpendicular à direção de escoamento. A altura a que a câmara foi posicionada teve sempre o intuito de permitir captar toda a largura da secção e observar com clareza os traçadores, para assim facilitar o estudo através dos *softwares* de análise LSPIV. Quanto mais alto ela estiver mais difícil será observar os traçadores. Relativamente à iluminação, a luz natural foi suficiente não sendo necessário efetuar quaisquer correções. Na zona de análise a luz não refletia na água, permitindo observar a circulação dos traçadores com clareza.

De modo a melhorar a qualidade e densidade de colocação dos traçadores, e sendo a secção simétrica, a análise concentrou-se numa das metades do curso de água.

O tempo de filmagem de cada ensaio foi cerca de um minuto e meio, sendo que, desse período foram escolhidos 4 s de gravação. Como a GoPro capta 47.95 imagens por segundo, em cada ensaio são analisadas cerca de 200 imagens. A duração do tempo de vídeo escolhido teve por base uma análise combinada entre a precisão dos resultados e o tempo de análise. A escolha do melhor período de vídeo a analisar baseou-se na maior dispersão e densidade de traçadores. Procurou-se examinar a secção mais central da câmara, pois a GoPro tem uma *wide lens* que causa uma distorção na imagem. A secção estudada neste ensaio de secção simples trapezoidal, em cada um dos *softwares*, foi de 0.60 m por 0.50 m. No PIVlab de modo a facilitar a observação dos traçadores usou-se o filtro Clahe com uma intensidade de 20 e Highpass com uma intensidade de 15 para a análise com o poliestireno. Utilizou-se apenas o filtro Clahe com uma intensidade de 20 para os papéis quadrangulares. Esta combinação foi a que permitiu observar os traçadores de forma mais nítida, e de todas as combinações de filtros utilizadas foi a que originou melhores resultados.

Para retirar os valores de velocidade superficial no *software* PIVlab foram desenhadas três linhas perpendiculares à direção do escoamento (atravessando de uma margem à outra), no início, no meio e no fim da secção escolhida. Cada linha será dividida em quarenta pontos onde serão obtidos valores de velocidade superficial. Com os resultados das três linhas é efetuada uma média das velocidades superficiais. No Fudaa o pré processamento é mais automático, pois o *software* faz autonomamente o processo de filtragem de imagens. A secção analisada tem de ser a mesma que a do PIVlab, de forma a serem examinadas as mesmas áreas de imagem. No Fudaa é possível obter todas as velocidades superficiais presentes na secção delineada. É necessário definir pelo menos quatro pares de pontos, em que as distâncias sejam conhecidas, de maneira a obter uma boa conversão de metros para pixels.

De modo a obter as velocidades médias através do ADV, foram efetuadas medições em 5 pontos diferentes da secção transversal a cerca de 40% da altura (desde o fundo).

De relembrar que inicialmente será eleito um coeficiente teórico, em que a sua escolha irá depender das características da secção e do escoamento, isto para, de alguma forma, tentar prever o caudal esperado de acordo com os estudos e conhecimentos já obtidas noutros artigos/dissertações. Numa segunda fase será procurado o coeficiente prático que seria necessário aplicar às velocidades superficiais de modo a obter o caudal imposto a montante em cada caso de estudo.

5.1.2 Ensaio A1 – Secção simples trapezoidal (1 caudal, 2 traçadores e 1 software - PIVlab)

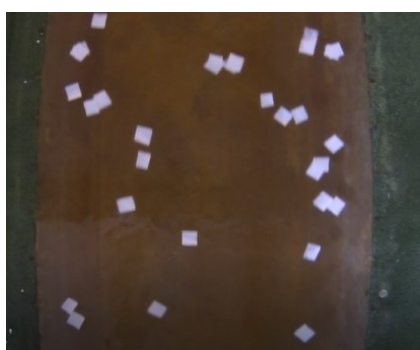
No ensaio A1 procura-se descobrir qual o melhor traçador para esta secção. Os dois traçadores foram testados num único caudal e analisados num único software, o PIVlab. No Quadro 5.1 apresenta-se um resumo dos ensaios efetuados com a caracterização de cada escoamento. O ensaio A1a é referente ao ensaio com o poliestireno como traçador e o A1b ao papel quadrangular com 2.5 cm de lado. O número de Froude é inferior a 1 logo o escoamento ocorre em regime lento.

Na Figura 5.1 encontra-se uma imagem de cada traçador utilizado no ensaio. Na Figura 5.2 estão presentes as velocidades superficiais, provenientes dos dois materiais testados e as velocidades médias obtidas com o ADV.

Quadro 5.1 – Condições dos ensaios A1.

Ensaio	Caudal [l/s]	Altura de escoamento [m]	Rh	Fr (-)	Massa do traçador [g]	Traçador
A1a	20	0.1	0.073	0.4	0.004	Poliestireno
A1b	20	0.1	0.073	0.4	0.069	Papel 2.5x2.5

a)



b)



Figura 5.1 – Imagens de cada traçador analisado neste ensaio em que a) corresponde à análise com os traçadores de 2.5 cm de lado e b) com o poliestireno como traçador.

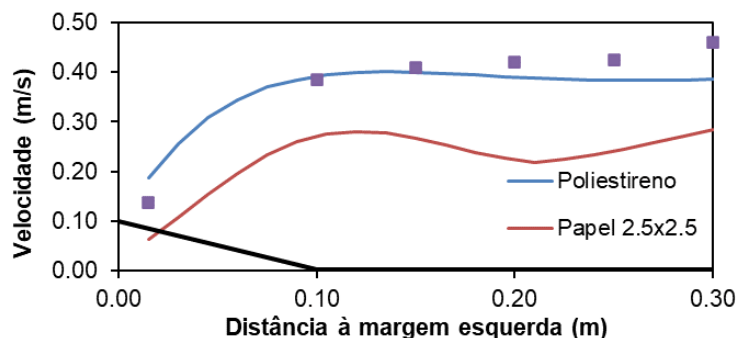


Figura 5.2 – Comparação das velocidades médias obtidas com o ADV com as velocidades superficiais adquiridas com o PIVlab com poliestireno e com papel 2,5x2,5 na secção simples.

Como é possível observar, o poliestireno apresenta uma curva de velocidades superficiais muito mais suave e regular que os papéis de 2.5 cm de lado. Na execução dos ensaios o poliestireno também se destacou. Foi muito mais fácil garantir que este estivesse bem disperso em toda a secção e com uma boa densidade. Os papéis de 2.5 cm de lado são bastante difíceis de espalhar uniformemente por toda a secção sem que se sobreponham ou não cubram certas zonas. Apesar das partículas de poliestireno por vezes se agruparem, devido à tensão superficial da água, são mais fáceis de lançar e nunca se sobrepõem, levando a que a secção fique uniformemente coberta. Outra razão que favorece o poliestireno são as velocidades obtidas em comparação com as do papel. Se ambos os materiais foram testados em condições bastante semelhantes e um apresenta velocidades superiores, quer dizer que o outro não está a caracterizar com eficácia o movimento superficial da água (possivelmente devido a diferença de massas dos traçadores). É também possível verificar que as velocidades superficiais obtidas com o poliestireno estão muito próximas das velocidades médias conseguidas com o ADV.

Para o cálculo da velocidade média na altura, a partir das velocidades superficiais, a escolha do coeficiente foi baseada nas conclusões de Hauet et al. (2018). O raio hidráulico é inferior a 1 m, então, supostamente, o coeficiente terá de estar entre 0.8 e 0.9. Como o material que compõe o solo do escoamento é betão polido, utilizou-se 0.9 como valor de coeficiente.

No Quadro 5.2 apresentam-se os resultados da comparação do caudal calculado com este coeficiente teórico com o caudal imposto a montante.

Quadro 5.2 – Comparação do caudal calculado aplicando um coeficiente teórico igual a 0.9 às velocidades superficiais com o caudal imposto a montante.

Ensaio	Caudal imposto a montante [l/s]	Caudal teórico [l/s]	Erro médio (%)
A1a	20	17.22	13.9
A1b	20	10.5	47.52

No cálculo do caudal com um coeficiente teórico estipulado, pode-se verificar que o papel 2.5x2.5 origina um erro médio maior. Este erro é justificado pelas baixas velocidades superficiais obtidas com este traçador. Devido a estes resultados e conclusões, o material utilizado para realizar os restantes ensaios na secção simples foi o poliestireno.

5.1.3 Ensaios A2 – Secção simples trapezoidal (4 caudais, 1 traçador e 2 softwares)

Depois de concluído o ensaio A1 e tiradas as respetivas conclusões, deu-se início ao ensaio A2. Neste ensaio foram estudados quatro caudais, um único traçador e dois *softwares* de análise, o PIVlab e o Fudaa. No Quadro 5.3 apresenta-se um resumo dos ensaios efetuados com a caracterização de cada escoamento. Como se observa, os escoamentos ocorrem em regime lento. No ensaio anterior concluiu-se que o poliestireno é o traçador que melhor caracteriza a movimentação superficial da água nesta secção e resultava em melhores estimativas de velocidade superficial (ensaio A1a). Devido a isso, neste ensaio será usado apenas esse traçador. Utiliza-se os número 1 e 2, logo a seguir a A2a, para distinguir os *softwares* de análise de resultados, sendo 1 para o PIVlab e 2 para o Fudaa e as letras a,b,c,d para os diferentes caudais de 5 l/s, 10 l/s, 15 l/s e 20 l/s, respetivamente.

São comparadas as velocidades superficiais obtidas com o PIVlab e com o Fudaa nos quatro caudais experimentados com as velocidades médias obtidas com o ADV, Figura 5.3. Pretende-se equiparar os perfis de velocidade e verificar se diferem muito de caudal para caudal.

Quadro 5.3 – Condições do escoamento nos ensaios A2.

Ensaio	Caudal (l/s)	Altura de escoamento (m)	Rh	Fr (-)	Software
A2a1a	5	0.071	0.056	0.18	PIVlab
A2a2a	5	0.071	0.056	0.18	Fudaa
A2a1b	10	0.084	0.064	0.27	PIVlab
A2a2b	10	0.084	0.064	0.27	Fudaa
A2a1c	15	0.095	0.070	0.33	PIVlab
A2a2c	15	0.095	0.070	0.33	Fudaa
A2a1d	20	0.100	0.073	0.40	PIVlab
A2a2d	20	0.100	0.073	0.40	Fudaa

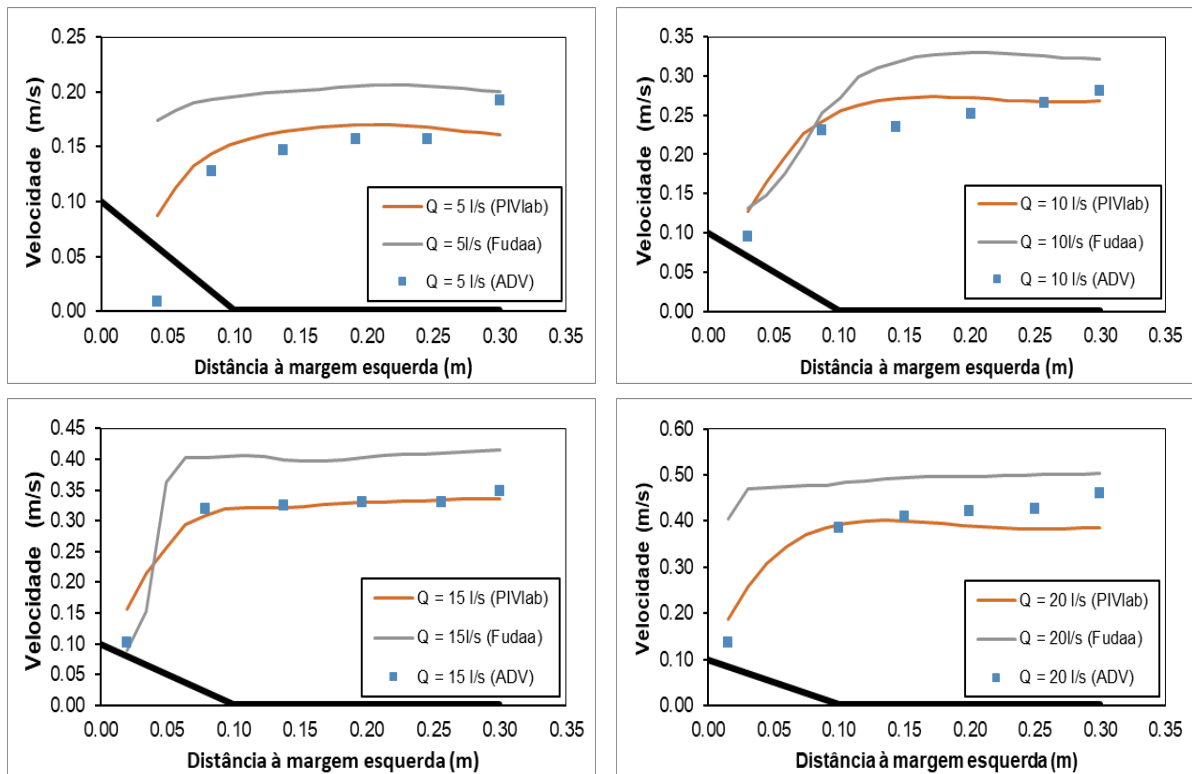


Figura 5.3 – Comparação das velocidades superficiais, adquiridas com o PIVlab e com o Fudaa, com as velocidades médias obtidas com o ADV na secção simples.

Como é possível verificar, o formato dos gráficos das velocidades superficiais, nos quatro caudais testados, são relativamente semelhantes às velocidades médias conseguidas com o ADV. O que os diferencia é o valor das velocidades que vai aumentando de caudal para caudal como já seria de esperar. O PIVlab apresenta um perfil de velocidades superficiais parabólico em que a velocidade vai aumentando na secção inclinada e fica constante na restante secção. No Fudaa os formatos dos gráficos de velocidade superficial não são tão regulares e semelhantes uns em relação aos outros. Contudo, as velocidades superficiais obtidas com o Fudaa são ligeiramente superiores às obtidas com o PIVlab e com o ADV.

No Quadro 5.4, encontram-se os caudais calculados com o coeficiente teórico de 0.9, aplicado às velocidades superficiais, em ambos os *softwares*. Na conversão de metros para pixéis o Fudaa apresentou um erro médio de 16.14%, enquanto o PIVlab apresentou um erro médio de conversão de 4%.

Quadro 5.4 – Comparação de caudais entre os dois *softwares* com um coeficiente teórico igual a 0.90.

Ensaio	Caudal imposto a montante [l/s]	Caudal calculado [l/s]	Erro (%)	Software
A2a1a	5	4.84	3.23	PIVlab
A2a2a	5	6.04	20.87	Fudaa
A2a1b	10	9.11	8.92	PIVlab
A2a2b	10	10.52	5.17	Fudaa
A2a1c	15	13.57	9.51	PIVlab
A2a2c	15	16.80	11.98	Fudaa
A2a1d	20	17.22	13.90	PIVlab
A2a2d	20	22.14	10.70	Fudaa

Em relação ao cálculo do caudal a partir do coeficiente teórico de 0.90, pode-se verificar que o Fudaa apresenta um erro associado maior que o PIVlab.

Depois de calculado o caudal, os valores apresentados no Quadro 5.5 são os valores do coeficiente prático, em cada um dos *softwares*, que seria necessário aplicar às velocidades superficiais para obter as velocidades médias na altura e conseqüentemente calcular o caudal imposto a montante. O PIVlab tem um coeficiente prático médio de 0.99 e o Fudaa de 0.81.

Quadro 5.5 – Coeficiente prático necessário aplicar às velocidades superficiais, no PIVlab e no Fudaa, de modo a obter o caudal imposto.

Q [l/s]	Coeficiente PIVlab	Coeficiente Fudaa
5	0.930	0.745
10	0.988	0.856
15	0.995	0.804
20	1.045	0.815

5.1.4 Análise de resultados

Relativamente aos traçadores testados no ensaio A1 é possível concluir que o poliestireno é o melhor traçador para esta secção. Com o poliestireno conseguiu-se garantir uma maior distribuição de traçadores em toda a secção e apresentar valores de velocidade superficial superiores e mais próximos dos obtidos com o ADV. Isto pode ser devido à secção analisada ser relativamente pequena, à sobreposição dos traçadores de 2.5 cm de lado ou devido à massa dos traçadores (a massa do papel quadrangular de 2.5 cm de lado é cerca de 17 vezes superior à do poliestireno).

Relativamente ao ensaio A2, no que diz respeito ao coeficiente teórico escolhido, que relaciona as velocidades superficiais com a velocidade média na altura, é possível verificar que o Fudaa apresenta um erro associado maior. Contudo, se o coeficiente escolhido fosse 0.85 e não 0.9, em média os caudais calculados com o Fudaa teriam apenas um erro de 6.21%, o que é relativamente baixo. O PIVlab com o coeficiente escolhido de 0.9 apresenta um erro médio de 8.82%, que também é

satisfatório. Ambos os valores estão a baixo do erro médio de 10% mencionado por Kim (2006), se a previsão do coeficiente teórico fosse correta.

Equiparando os valores de coeficiente prático com o enquadramento teórico, pode-se concluir que o Fudaa é o *software* que apresenta valores de coeficiente mais aceitáveis e entre os limites apresentados por Polatel (2005). As velocidades superficiais adquiridas pelo Fudaa são superiores relativamente às velocidades adquiridas com o PIVlab, logo os coeficientes serão menores que os coeficientes obtidos com o PIVlab. Esta diferença de velocidades entre os dois *softwares* pode ser justificada pela diferença na conversão de metros para pixéis, onde o Fudaa apresenta um erro maior. Os valores do coeficiente no Fudaa não são tão constantes como os do PIVlab, para além disso, no PIVlab é possível verificar que há um aumento do valor do coeficiente com o aumento da altura de água – o que vai de encontro com o que foi mencionado no enquadramento teórico.

5.2 Secção composta

5.2.1 Procedimentos iniciais

Os procedimentos para a realização dos ensaios na secção composta foram bastantes semelhantes aos efetuados na secção simples retangular. Primeiramente, é fundamental ter uma boa quantidade de papéis quadrangulares de 4 e 8 cm e de poliestireno – de forma, a garantir uma boa densidade de traçadores em toda a secção. A colocação dos traçadores foi realizada a montante da secção em análise e a câmara colocada a cerca de 2 m de altura (a contar desde a superfície livre). Em relação à iluminação, não foi necessário fazer quaisquer adaptações uma vez que se verificou que a luz natural era suficiente. De modo a melhorar a qualidade e densidade de traçadores, e sendo a secção simétrica, a análise concentrou-se novamente numa das metades do canal.

O tempo de filmagem de cada ensaio foi cerca de um minuto, desse minuto foram analisadas cerca de 200 imagens devidas às mesmas razões apresentadas nos ensaios à secção simples. A secção de análise obtida foi uma de 2 m de comprimento por 1 m de largura. No PIVlab usou-se o filtro Clahe com intensidade 20 e o Highpass com intensidade 15 para a análise com o poliestireno. Para a análise com os traçadores quadrangulares, apenas foi utilizado o filtro Clahe com intensidade 20. Os dados das velocidades superficiais com o PIVlab são provenientes da média de três linhas, perpendiculares ao escoamento e divididas em quarenta pontos. No Fudaa foram tomadas as mesmas precauções tidas em conta no ensaio anterior.

De modo a obter as velocidades médias através do ADV, foram efetuadas medições em 20 pontos diferentes da secção transversal a cerca de 40% da altura (desde o fundo).

À semelhança do ensaio anterior serão realizados dois estudos ao coeficiente aplicado às velocidades superficiais. Primeiro será aplicado um coeficiente teórico para, de certa forma, verificar se uma previsão do coeficiente a partir dos estudos mencionados no enquadramento teórico resultaria num caudal próximo do imposto. De seguida será variado o coeficiente de forma a obter o caudal imposto e verificar se é possível relacionar os coeficientes de todos os caudais testados.

5.2.2 Ensaios B1 – Secção composta (1 caudal, 3 traçadores, 1 software - PIVLAB)

Neste ensaio será estudado qual o melhor traçador para esta secção. Para isso serão utilizados três traçadores com diferentes formatos num único caudal. A análise será realizada no *software* PIVlab. No Quadro 5.6 apresenta-se um resumo dos ensaios efetuados com a caracterização do escoamento. O ensaio B1a refere-se ao ensaio com o poliestireno como traçador, B1b ao ensaio com o papel quadrangular de 4 cm de lado e B1c ao ensaio com o papel quadrangular com 8 cm de lado. Como se observa, o escoamento ocorre em regime lento.

Na Figura 5.4 encontra-se uma imagem de cada traçador utilizado no ensaio. Na Figura 5.5 está a comparação das velocidades médias medidas com o ADV e as velocidades superficiais, provenientes dos dois materiais testados, com o *software* de análise PIVlab.

Quadro 5.6 – Caracterização da secção de escoamento no ensaio B1.

Ensaio	Q_{mc} [l/s]	Q_{fp} [l/s]	y_{mc} [m]	y_{fp} [m]	Rh_{mc} [m]	Rh_{fp} [m]	fr_{mc}	fr_{fp}	Massa do Traçador [g]	Traçador
B1a	42.3	16.6	0.145	0.045	0.1	0.042	0.461	0.397	0.004	Poliestireno
B1b	42.3	16.6	0.145	0.045	0.1	0.042	0.461	0.397	0.128	Papel 4x4
B1c	42.3	16.6	0.145	0.045	0.1	0.042	0.461	0.397	0.512	Papel 8x8

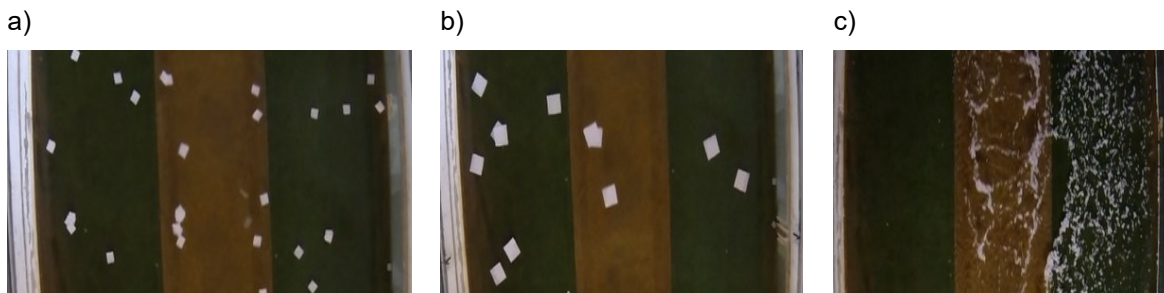


Figura 5.4 – Imagens de cada traçador analisado neste ensaio em que a) corresponde aos traçadores de 4 cm de lado, b) ao traçador de 8 cm de lado e c) ao poliestireno.

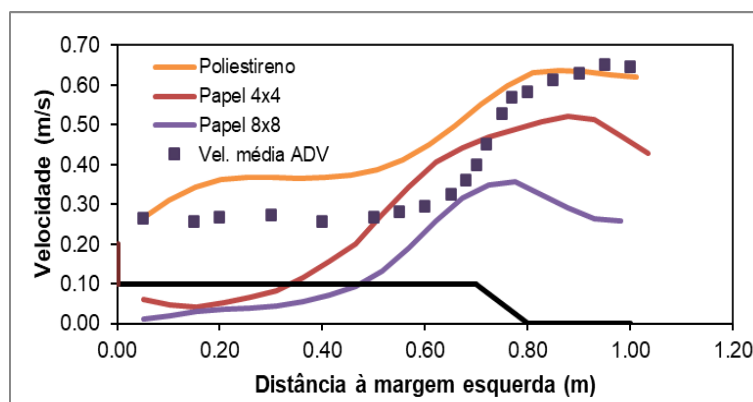


Figura 5.5 – Comparação das velocidades superficiais e as velocidades médias adquiridas com o ADV, na secção composta.

Como é possível verificar, o poliestireno é o traçador que melhor representa o campo das velocidades superficiais pois apresenta uma curva de velocidades muito mais regular e plausível que os outros dois traçadores. Observa-se também que a curva de velocidade superficial dos três traçadores apresenta um pequeno declínio no centro da secção onde a velocidade deveria ser a máxima. Este declínio pode ser justificado pela densidade insuficiente de traçadores na secção central. Comparando as curvas de velocidade superficial conseguidas com estes traçadores com a curva de velocidade média do ADV, pode-se afirmar que o poliestireno é o traçador que representa melhor a velocidade superficial do escoamento, pois apresenta uma curva de velocidades mais aceitável e com valores de velocidade superiores.

Para o cálculo da velocidade média na altura, a escolha do coeficiente foi baseada nas conclusões de Hauet et al. (2018). O raio hidráulico é inferior a 1 m, mas o solo do escoamento não é só composto por betão polido, mas também por relva sintética. Logo, o coeficiente teórico que relaciona as velocidades superficiais com as velocidades médias será inferior ao utilizado no ensaio à secção simples. Assim sendo, o coeficiente escolhido foi 0.85. No Quadro 5.7 apresentam-se os resultados da comparação do caudal calculado, a partir deste coeficiente teórico, com o caudal imposto a montante bem como os erros obtidos.

Quadro 5.7 – Comparação entre o caudal imposto a montante com o caudal calculado a partir do coeficiente teórico igual a 0.85.

Ensaio	Caudal imposto a montante [l/s]	Caudal calculado [l/s]	Erro (%)
B1a	58.9	61.02	3.59
B1b	58.9	42.13	28.48
B1c	58.9	24.96	57.62

No cálculo do caudal com um coeficiente teórico estipulado, pode-se verificar que o poliestireno é o traçador que apresenta um erro inferior comparativamente aos outros. As velocidades obtidas com os traçadores de 4 e 8 cm são inferiores às velocidades obtidas com o poliestireno e certamente inferiores às velocidades médias do escoamento. A partir destes resultados, pode-se concluir que estes dois traçadores são incapazes de caracterizar com eficácia a velocidade superficial da água pois fornecem velocidades superficiais inferiores às que estão realmente presentes. Devido a isto, foi usado o poliestireno nos restantes ensaios laboratoriais.

5.2.3 Ensaio B2 – Secção composta (3 caudais, 1 traçador, 2 softwares)

Finalizado o ensaio B1 procedeu-se ao ensaio B2 onde se testaram três caudais e dois *softwares* de análise. O objetivo prendeu-se em estudar o comportamento do coeficiente que relaciona as velocidades superficiais com as velocidades médias na altura e perceber qual dos dois *softwares* produz melhores resultados. No Quadro 5.8 apresenta-se o resumo dos ensaios efetuados com a caracterização dos escoamentos que ocorrem em regime lento.

No ensaio B1 concluiu-se que o melhor traçador é o poliestireno (B1a). Desta forma, será utilizado apenas esse traçador neste ensaio (B2a). Utiliza-se o número 1 e 2 a seguir a B2a, para distinguir os *softwares* de análise de resultados, sendo 1 para o PIVlab e 2 para o Fudaa e as letras *a*, *b* e *c* para os diferentes caudais de 38.80 l/s, 46.60 l/s e 58.90 l/s.

São apresentadas as velocidades superficiais conseguidas com o PIVlab e com o Fudaa nos três caudais e as velocidades médias obtidas com o ADV, Figura 5.6.

Quadro 5.8 – Condições dos ensaios B2.

Ensaio	Q_{mc} [l/s]	Q_{fp} [l/s]	y_{mc} [m]	y_{fp} [m]	Rh_{mc} [m]	Rh_{fp} [m]	fr_{mc}	fr_{fp}	Software
B2a1a	35.1	3.7	0.1192	0.0192	0.085	0.019	0.528	0.317	PIVlab
B2a2a	35.1	3.7	0.1192	0.0192	0.085	0.019	0.528	0.317	Fudaa
B2b1b	39.3	7.3	0.1244	0.0244	0.088	0.024	0.551	0.437	PIVlab
B2b2b	39.3	7.3	0.1244	0.0244	0.088	0.024	0.551	0.437	Fudaa
B2c1c	42.3	16.6	0.145	0.0450	0.100	0.042	0.461	0.397	PIVlab
B2c2c	42.3	16.6	0.145	0.0450	0.100	0.042	0.461	0.397	Fudaa

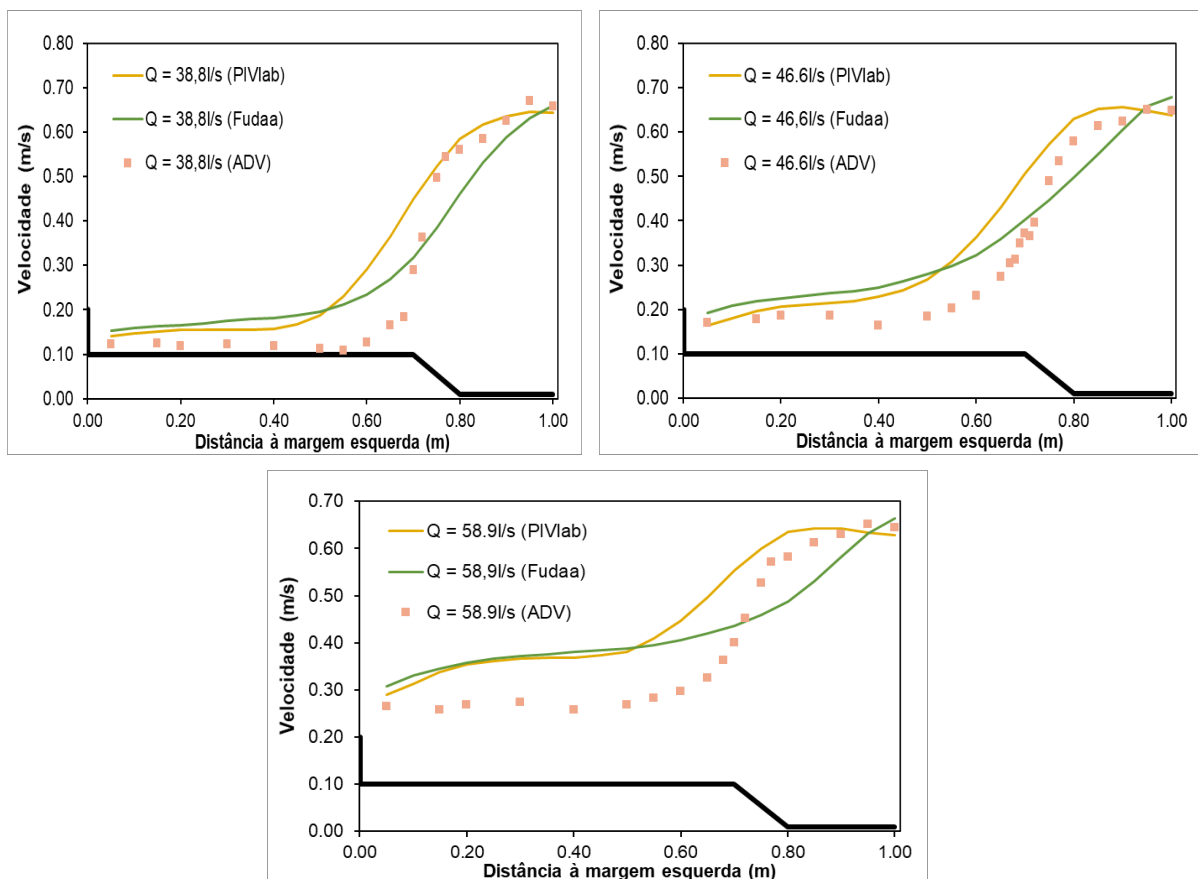


Figura 5.6 – Comparação das velocidades superficiais obtidas com o LSPIV e as velocidades médias do ADV na secção composta.

Analisando inicialmente os resultados obtidos com o PIVlab presentes na Figura 5.6, podemos verificar que as curvas de velocidade são bastante semelhantes às do ADV. Comparando os valores

de velocidade nas diferentes secções, pode-se observar que no leito de cheia (com relva sintética) as velocidades superficiais vão aumentando de caudal para caudal e são superiores às velocidades médias. No leito principal (de betão polido) as velocidades superficiais são ligeiramente superiores às velocidades médias e convergem mais ou menos para o mesmo valor no centro da secção. Isto sugere que a utilização de um coeficiente (que relaciona a velocidade média com a velocidade superficial) único não deverá ser correto para este canal com secções de diferentes rugosidades.

Examinando os resultados do Fudaa, conclui-se que estes são relativamente semelhantes aos obtidos com o PIVlab e com o ADV. As velocidades vão aumentando de caudal para caudal no leito de cheia e convergem para um valor constante no leito principal. A comparação de caudais com o coeficiente teórico de 0.85 encontra-se no Quadro 5.9. Na conversão de metros para pixéis o Fudaa apresentou um erro médio de 4% e o PIVlab um erro médio de 1.14%.

Quadro 5.9 – Comparação de caudais entre os dois *softwares* com um coeficiente teórico igual a 0.85.

Ensaio	Caudal imposto a montante [l/s]	Caudal calculado [l/s]	Erro (%)	Software
B2a1a	38.80	36.34	6.34	PIVlab
B2a2a	38.80	32.82	15.42	Fudaa
B2a1b	46.60	41.85	8.91	PIVlab
B2a2b	46.60	38.20	16.40	Fudaa
B2a1c	58.90	61.02	4.38	PIVlab
B2a2c	58.90	55.83	5.21	Fudaa

Em relação aos caudais calculados com o coeficiente teórico, que relaciona as velocidades superficiais com as velocidades médias na altura, de 0.85, é possível constatar que ambos os *softwares* apresentam erros relativamente baixos. Ainda assim, os caudais calculados com o PIVlab foram os que tiveram mais próximos dos caudais impostos.

No Quadro 5.10 encontram-se os valores dos coeficientes práticos que seria necessário aplicar as velocidades superficiais para obter o caudal imposto.

Quadro 5.10 – Valores de coeficiente prático que seria necessário aplicar para obter o caudal imposto a montante.

Q [l/s]	Coeficiente PIVlab	Coeficiente Fudaa
38.80	0.905	1.005
46.60	0.933	1.017
58.90	0.814	0.895

5.2.4 Análise do coeficiente na secção composta

No ensaio B2 foi notada uma possível variação do coeficiente aplicado às velocidades superficiais de maneira a obter as velocidades médias em profundidade do leito principal para o leito

de cheia. Devido a isto, decidiu-se variar o seu valor para as diferentes secções. Foi aplicado um coeficiente às velocidades superficiais no leito principal e outro no leito de cheia. Procurou-se obter o caudal imposto a montante e aproximar ao máximo os perfis de velocidade média obtidos com o LSPIV, depois de aplicado o coeficiente, aos obtidos com o ADV, em cada um dos leitos.

No Quadro 5.11 encontram-se os valores do coeficiente para cada leito nos três caudais testados. Na Figura 5.7 encontram-se a comparação dos de gráficos de velocidade média, em cada *software*, depois de aplicados os coeficientes às velocidades superficiais.

Quadro 5.11 – Valores dos coeficientes práticos em cada um dos leitos, nos dois softwares de análise.

Caudal [l/s]	Leito	Coefficiente PIVlab	Coefficiente Fudaa
38.80	Cheia	0.610	0.850
	Principal	0.950	1.034
46.60	Cheia	0.680	0.890
	Principal	1.000	1.050
58.90	Cheia	0.700	0.741
	Principal	0.940	0.990

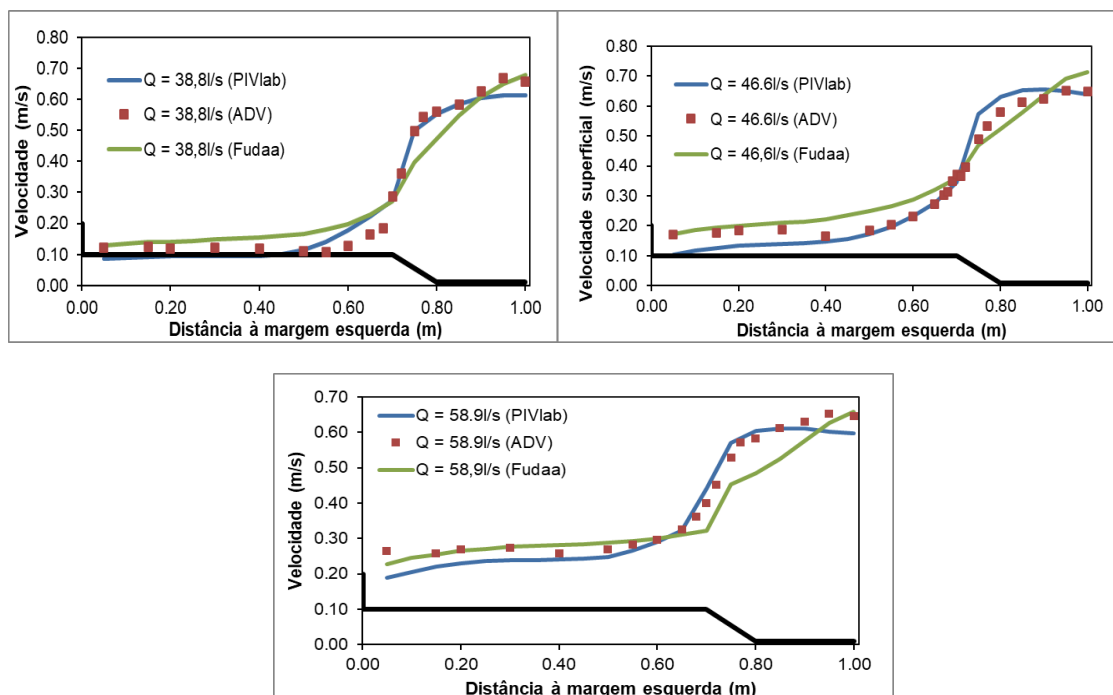


Figura 5.7 – Velocidades médias dos três caudais testados aplicando diferentes coeficientes em cada leito.

5.2.5 Análise de resultados

Começando por comentar o ensaio B1, onde se realizou um estudo aos traçadores, concluiu-se que o poliestireno é o traçador que melhor caracteriza o escoamento superficial – como aconteceu

no ensaio anterior A1. As velocidades obtidas com os papéis quadrangulares são inferiores às conseguidas com o poliestireno e o caudal calculado, aplicando um coeficiente teórico de 0.85 às velocidades superficiais com o objetivo de obter as velocidades médias na altura, apresenta um erro superior a 25%. Mesmo com um coeficiente igual a 1 o erro mínimo seria de 15%. Se avaliarmos a teoria de Chen (2018) que refere que os traçadores devem ser quadrangulares e possuir de lado 3.80% a 6.33% da largura média do curso de água, esta não faria muito sentido para, por exemplo, um escoamento com 10 metros de secção transversal. Uma secção com uma largura média de 10 m, iria originar traçadores, no mínimo, com 38 centímetros de lado. Seria muito difícil traçadores desse tamanho caracterizarem com precisão a velocidade superficial da água, pois a sua massa e tamanho já seriam significativos.

Quanto aos coeficientes que relacionam as velocidades superficiais com as velocidades médias na altura, resultantes do ensaio B2, é possível concluir que o PIVlab é o *software* que apresenta coeficientes mais coerentes com o enquadramento teórico. Os caudais calculados com o coeficiente teórico de 0.85 foram bastante aceitáveis, onde o PIVlab apresentou um erro médio de 5% e o Fudaa de 13%. De modo a obter o caudal imposto, o coeficiente prático médio no PIVlab é 0.89 e no Fudaa 0.97. As velocidades superficiais obtidas com o PIVlab foram superiores às velocidades obtidas com o Fudaa, logo o Fudaa tem um coeficiente maior. Como a secção é composta por dois tipos de revestimento, com diferentes rugosidades, é de esperar que o coeficiente obtido na secção composta seja inferior ao obtido na secção simples. O que acontece no PIVlab, mas não acontece no Fudaa. Em relação à subida do valor do coeficiente (que relaciona as velocidades superficiais com as médias) com o aumento da altura de água, em ambos os *softwares*, a relação apenas se verificou entre os caudais de 38.80 l/s e 46.60 l/s. O valor do coeficiente para o caudal de 58.90 l/s é inferior comparativamente aos restantes.

Ao analisar os gráficos de velocidade superficial do ensaio, foi perceptível que no leito de cheia os valores de velocidade superficial iam aumentando com a subida do caudal, mas no leito principal os valores da velocidade convergiam para um valor. Isto sugere a que não seja adequado considerar um coeficiente prático geral para esta secção composta. Devido a este facto, foi realizado um estudo ao coeficiente nos diferentes leitos. Com o PIVlab o coeficiente prático médio para os três caudais no leito principal é 0.97 e no leito de cheia 0.66. Relembra-se que nos ensaios A2, secção simples trapezoidal, o coeficiente prático médio obtido foi 0.99. Ou seja, o valor do coeficiente na secção do leito principal, com as mesmas características, é muito próximo. O mesmo não acontece com o Fudaa, neste ensaio o valor do coeficiente prático médio para o leito principal 1.035 e para o leito de cheia é 0.82. No ensaio da secção simples trapezoidal o coeficiente prático médio aplicado às velocidades superficiais para obter o caudal imposto a montante foi 0.81. Os valores do coeficiente na mesma secção diferem muito não sendo possível relacionar os dois ensaios.

Por último, é importante comentar a dificuldade em garantir uma boa distribuição de traçadores na superfície da água. As velocidades superficiais neste escoamento foram substancialmente superiores comparativamente ao ensaio anterior e a secção em estudo era muito maior.

5.3 Secção simples retangular

5.3.1 Procedimentos iniciais

Os procedimentos iniciais para a realização dos ensaios na secção simples retangular, foram semelhantes aos das outras secções analisadas. Para esta secção foi utilizado um único traçador, o poliestireno. No ensaio à secção simples trapezoidal e no ensaio à secção composta o poliestireno foi o traçador que forneceu melhores resultados, devido a isso optou-se por utilizar apenas este traçador no ensaio. A colocação dos traçadores foi realizada a montante da secção em análise, a câmara colocada a cerca de 0.80 m de altura (a contar desde o nível de água).

Em relação à iluminação, à semelhança dos outros ensaios, não foi necessário realizar quaisquer adaptações uma vez que se verificou que a luz natural era suficiente. De modo a melhorar a qualidade e distribuição de traçadores, e sendo a secção simétrica, a análise concentrou-se numa das metades do curso de água.

O tempo de filmagem de cada ensaio foi cerca de um minuto, desse minuto foram analisadas cerca de 200 imagens que corresponde a cerca de 4s de gravação. A secção de análise escolhida tem 0.60 m de comprimento e 0.5 m de largura. No PIVlab, utilizou-se o filtro Clahe com uma intensidade 20 e também o Highpass com uma intensidade 15. Foram tomadas as mesmas precauções tidas em conta nos ensaios anteriores para retirar os resultados de velocidade superficial em ambos os *softwares*.

Como já foi mencionado, será aplicado um coeficiente teórico a estas velocidades superficiais para saber se as previsões efetuadas com as informações do enquadramento teórico se aplicam nesta secção. De seguida, será calculado o coeficiente prático que seria necessário aplicar as velocidades superficiais de forma a obter a velocidade média na altura e consequentemente obter o caudal imposto a montante

Na conversão de metros para pixéis, o PIVlab apresentou um erro médio associado de 3.13% e o Fudaa um erro de 36.72%.

5.3.2 Ensaio C – Secção Simples retangular

Para este ensaio não foi possível medir as velocidades médias com o ADV. Devido a isso, serão apenas comparadas as velocidades superficiais obtidas em cada um dos *softwares* de análise LSPIV.

No Quadro 5.12 apresenta-se o resumo dos ensaios efetuados com a caracterização do escoamento (a densidade e a viscosidade de água igual aos dos outros ensaios). Na Figura 5.8 encontra-se uma das imagens analisadas, com poliestireno como traçador. Na Figura 5.9 estão presentes as velocidades superficiais obtidas com o PIVlab e com o Fudaa nos dois ensaios.

Quadro 5.12 – Condições dos ensaios na secção retangular.

Ensaio	Q [l/s]	y [m]	A [m ²]	Um [m.s ⁻¹]	Rh [m]	Fr
C1	11.04	0.175	0.105	0.106	0.106	0.08
C2	30.41	0.225	0.1344	0.226	0.128	0.15



Figura 5.8 – Uma das imagens analisadas neste ensaio de secção simples retangular.

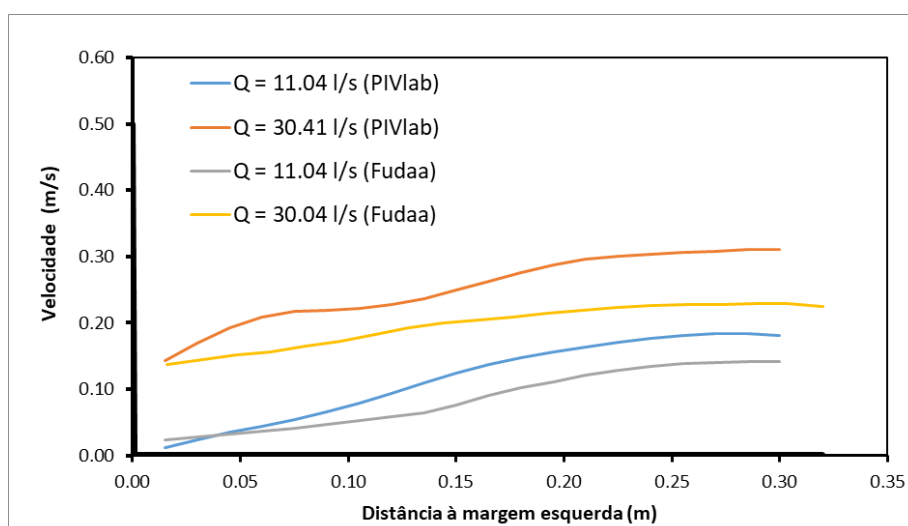


Figura 5.9 – Velocidades superficiais obtidas com o PIVlab e com o Fudaa na secção simples rectangular.

Como é possível verificar, o formato dos gráficos das velocidades são todos bastante semelhantes, regulares e dentro do esperado. O que os diferencia é o valor das velocidades que vai aumentando de caudal para caudal, como já seria de esperar. De notar ainda que as velocidades obtidas no PIVlab são superiores às do Fudaa. Tentando prever o coeficiente que relaciona as velocidades superficiais com a velocidade média na altura, segundo Hauet et al. (2018), foi selecionado um coeficiente de 0.85. Visto que o raio hidráulico é inferior a 1 m, o solo do canal é composto por uma camada de brita e de todos os ensaios efetuados este é o que apresenta maior altura de água – o valor escolhido foi considerado o mais adequado. No Quadro 5.13 estão expostos os valores de caudal calculados com esse mesmo coeficiente teórico e também o erro associado. Para a descrição do ensaio

as letras (a) e (b) servem para distinguir os *softwares* usados, em que, (a) corresponde ao PIVlab e (b) ao Fudaa.

Quadro 5.13 – Valores de caudal calculados com um coeficiente teórico igual a 0.85 e respetivos erros.

Ensaio	Caudal imposto a montante [l/s]	Caudal calculado [l/s]	Erro (%)	Software
C1a	11.04	10.37	6.07	PIVlab
C1b	11.04	7.64	30.84	Fudaa
C2a	30.41	27.02	11.14	PIVlab
C2b	30.41	22.47	26.10	Fudaa

No Quadro 5.14 estão presentes os coeficientes práticos que seria necessário aplicar as velocidades superficiais de maneira a obter o caudal imposto a montante.

Quadro 5.14 – Coeficientes práticos obtidos na secção simples retangular.

Q [l/s]	Coeficiente PIVlab	Coeficiente Fudaa
11.04	0.904	1.194
30.41	0.956	1.150

5.3.3 Análise de resultados

Analisando o Quadro 5.13, pode-se concluir que o PIVlab é o *software* que apresenta um erro menor na tentativa de previsão do caudal do escoamento. O erro médio do PIVlab no cálculo do caudal com o coeficiente teórico é 8.6% e o erro médio do Fudaa é 28.47%.

No Quadro 5.14, olhando para o coeficiente prático que seria necessário aplicar às velocidades superficiais, de maneira a obter as velocidades médias na altura e consequentemente o caudal imposto, pode-se constatar, que o PIVlab é o *software* mais coerente com o enquadramento teórico e com o resto dos ensaios realizados até agora. O coeficiente prático médio adquirido com o PIVlab neste ensaio é de 0.93. Apesar deste coeficiente se encontrar fora dos limites estipulados por Polatel (2005), 0.789 e 0.928, este valor é inferior ao coeficiente prático médio obtido na secção simples trapezoidal, 0.99. Era esperado um coeficiente inferior, pois o solo da secção simples retangular é composto por uma camada de brita e o solo da secção simples trapezoidal é composto por betão polido, ou seja, a rugosidade de fundo da secção retangular é superior à rugosidade de fundo da secção trapezoidal. Segundo o enquadramento teórico, o coeficiente é menor em secções com maior rugosidade de fundo, apesar disso, a diferença entre os coeficientes não poderia ser muito elevada pois a diferença da altura de água de um ensaio para o outro é substancial.

Em relação à variação do coeficiente com o aumento da altura de água, no PIVlab verifica-se que estes também estão relacionados, pois com esse crescimento o coeficiente também aumenta (como aconteceu nos restantes ensaios).

A partir dos dados adquiridos com o Fudaa não é possível realizar qualquer tipo de comparação que seja coerente, pois os resultados não correspondem ao esperado. Apesar do formato do gráfico

de velocidades superficiais ser aceitável, os seus valores são reduzidos originando valores de coeficiente superiores a 1.

As velocidades superficiais obtidas nesta secção foram as mais elevadas dos três ensaios efetuados em laboratório. À semelhança do ensaio na secção composta, foi mais complicado garantir uma boa distribuição de traçadores de poliestireno.

5.4 Resumo dos ensaios laboratoriais

No Quadro 5.15 é apresentado o resumo de todos os ensaios efetuados onde se apresenta as características dos escoamentos, os coeficientes teóricos escolhidos com os respetivos erros no cálculo do caudal e os coeficientes práticos que se obteve em cada escoamento.

Quadro 5.15 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório.

Secção	Q [l/s]	Rh [m]		Fr		Coeficiente Teórico	Software	Erro %	Coeficiente prático
		Rh _{mc} [m]	Rh _{fp} [m]	fr _{mc}	fr _{fp}				
Simples trapezoidal	20.00	0.073		0.40		0.90	PIVlab	13.90	1.045
							Fudaa	10.70	0.815
	15.00	0.070		0.33		0.90	PIVlab	9.51	0.995
							Fudaa	11.98	0.804
	10.00	0.064		0.27		0.90	PIVlab	8.92	0.988
							Fudaa	5.17	0.856
5.00	0.056		0.18		0.90	PIVlab	3.23	0.930	
						Fudaa	20.87	0.745	
Composta	58.90	0.100	0.042	0.46	0.40	0.85	PIVlab	4.38	0.814
							Fudaa	5.21	0.895
	46.60	0.088	0.024	0.55	0.44	0.85	PIVlab	8.91	0.933
							Fudaa	16.40	1.017
	38.80	0.085	0.019	0.53	0.32	0.85	PIVlab	6.34	0.905
							Fudaa	15.42	1.005
Simples retangular	30.41	0.128		0.15		0.85	PIVlab	6.07	0.956
							Fudaa	30.84	1.150
	11.04	0.106		0.08		0.85	PIVlab	11.14	0.904
							Fudaa	26.10	1.194

A partir dos ensaios de laboratório é possível desde já concluir que o PIVlab é o *software* que fornece resultados mais coerentes e possíveis de relacionar. É admissível estabelecer uma relação entre o coeficiente aplicado às velocidades superficiais e a altura de água, em que, o valor do coeficiente aumenta com o aumento da altura de água. Para além disso, é possível constatar que o PIVlab é um *software* muito mais rápido e intuitivo de utilizar.

No que toca aos traçadores, o poliestireno foi o que forneceu melhores resultados de velocidade superficial nos dois *softwares*. Uma possível justificação é a facilidade de arremesso do poliestireno permitindo garantir uma distribuição uniforme na secção de análise pretendida sem que os traçadores se sobreponham.

6 Estudos de campo

6.1 Procedimentos iniciais

Para realizar os ensaios de campo é necessário tomar algumas precauções. Em primeiro lugar, é essencial examinar a meteorologia de modo a eleger um dia com as características mais adequadas, ou seja, céu limpo e pouco vento. O objetivo é captar em vídeo os traçadores na superfície do escoamento sem ter que recorrer a iluminação extra. Por outro lado, é importante não haver vento forte que afete a superfície do escoamento ou que impossibilite o voo do drone.

O ensaio de campo no curso de água do Carregado ocorreu dia 15 de março de 2021, pelas 18 horas. O céu encontrava-se limpo e o vento existente não era o suficiente para interferir com a velocidade superficial da água. A iluminação natural foi a suficiente para visualizar os traçadores na câmara e como o sol se estava a pôr não existiam reflexões na água.

À semelhança dos ensaios laboratoriais foi usado o método da secção velocidade para descobrir o caudal do escoamento. A velocidade foi medida inicialmente com um ADCP e de seguida com o método LSPIV.

Para as medições com o ADCP foi necessário construir uma estrutura que fizesse flutuar o aparelho na água. Foi utilizado uma placa de XPS com madeira por cima, de maneira a dar mais sustentabilidade e suporte, Figura 6.1a). Foram utilizadas 5 cordas, duas em cada lateral para movimentar o ADCP ao longo da secção e uma na frente na secção frontal de forma a impedir que a estrutura se mova para jusante, Figura 6.1b).

a)



b)



Figura 6.1 – a) Estrutura utilizada para suportar o ADCP e b) ADCP já instalado no curso de água pronto a realizar medições

De salientar que o ADCP fornece um perfil de velocidades em profundidade, começando a medir a cerca de 10 cm abaixo do nível do aparelho e adquire valores pelo menos de 10 em 10 cm. Com este aparelho é possível ter uma ideia da batimetria do canal, pois os resultados perto do fundo começam a

fornecer valores incoerentes e contraditórios. Sabendo o espaçamento entre as células de medição, sabe-se a profundidade dos resultados com valores contraditórios, sendo possível definir, aproximadamente, a batimetria do canal.

Para o ensaio com o método LSPIV apenas são necessários traçadores e um drone com uma câmara capaz de registrar os movimentos na superfície da água. Como foi referido anteriormente, o LSPIV não fornece dados relativos à batimetria, ou seja, estes terão de ser obtidos através de outro método/aparelho.

Foram utilizados traçadores de papel por serem mais biodegradáveis e, logo, muito menos prejudiciais para o ambiente comparativamente ao poliestireno. Analisando os ensaios laboratoriais foi possível concluir que quanto menor o traçador melhor serão os resultados das velocidades superficiais. Deste modo, foram experimentados três traçadores quadrangulares, com 1, 2 e 4 cm de lado. Decidiu-se optar por três traçadores com alguma diferença de comprimento para perceber se as velocidades em campo também diminuem com o aumento de comprimento do traçador. De frisar que os traçadores têm de ser visíveis na câmara e como o drone estará a uma altura relativamente alta os traçadores não poderiam ser demasiado pequenos. O objetivo é perceber que traçador fornece valores de velocidade superficial mais aceitáveis e coerentes. Para diminuir a probabilidade de erros nos resultados do ensaio é muito importante que o drone se mantenha estável e sem variar a sua posição enquanto decorre a gravação.

Para testar a exequibilidade do método LSPIV este ensaio também será dividido em duas fases. A primeira em que se tentará prever o coeficiente necessário aplicar às velocidades superficiais e uma segunda fase onde será encontrado o coeficiente prático do escoamento de modo a analisar e comparar este valor com os dos restantes ensaios realizados. Os erros calculados com o coeficiente teórico e prático têm como pressuposto que o caudal calculado com o ADCP é o que está realmente presente no escoamento.

6.2 Resultados

6.2.1 ADCP

Como o escoamento no curso de água está totalmente dependente do fenómeno de marés, foi escolhido um dia em que a diferença de preia-mar para baixa-mar fosse considerável, neste caso, 3,6 m de preia-mar e 0.6 m de baixa-mar, isto para que existam velocidades mensuráveis. O ADCP foi programado para realizar medições com 20 s de duração. Foram efetuadas medições de metro a metro, ao longo da secção transversal do escoamento e em cada posição foram retirados três perfis de velocidade pelo ADCP.

O caudal inicial não é igual ao final, pois a maré encontra-se a vazar, portanto, foram medidas as alturas de água no início e no fim das medições. A média das duas alturas de água é 1.20 m o que corresponde a uma largura de secção de 9.5 m.

É possível executar o ensaio com o ADCP de duas formas: colocá-lo na água conectado com um cabo, que o liga diretamente ao computador; ou desconectado, em que os valores de velocidade são passados para o computador no final da medição. A primeira opção pareceu a mais adequada não

só pela coordenação que iria ser necessária para realizar o ensaio com o ADCP desconectado, como pelo facto de assim se conseguir perceber se estão a ser obtidos resultados e se estes estão na posição pretendida. A movimentação entre posições teria de ocorrer no intervalo de tempo programado entre medições, o que também aumentaria a probabilidade de existirem erros no ensaio. Em consequência desta escolha, só foi possível retirar valores de velocidade até cerca de 6.5 m de distância da margem direita (devido ao comprimento do cabo de ligação entre o computador e o ADCP). Como a secção é simétrica e o trecho é retilíneo esta distância é suficiente. No Quadro 6.1 encontram-se as características do escoamento.

Quadro 6.1 – Características do escoamento do ensaio de campo

Q [l/s]	y [m]	A [m ²]	U_m [m.s ⁻¹]	Rh [m]	Fr
1115.61	1.20	9.98	0.112	0.951	0.28

Devido ao peso do ADCP e da estrutura que o segura, este encontra-se submerso a cerca de 10 cm de profundidade e começa a recolher valores 10 cm a baixo da sua posição inicial. O primeiro resultado encontra-se a 20 cm de profundidade, considerando o nível de água o zero referencial. O ADCP fornece valores de 10 em 10 cm, portanto, com estes dados seria possível determinar o formato da secção do escoamento a partir do aparelho. Contudo, muitos dos dados obtidos não foram de encontro com o esperado, pois valores de velocidade abaixo da secção de escoamento continuavam a ser aceitáveis.

Possíveis razões para estes erros de medição estão relacionados com a dificuldade em manter o ADCP imóvel enquanto se executava o ensaio e com a existência de vegetação no fundo do canal.

6.2.2 Velocidades médias ADCP

Sendo a secção simétrica e considerando a metade direita do escoamento, a curva de velocidades médias é a representada na Figura 6.2. Para a média das velocidades só foram consideradas as velocidades coerentes e de encontro com o esperado.

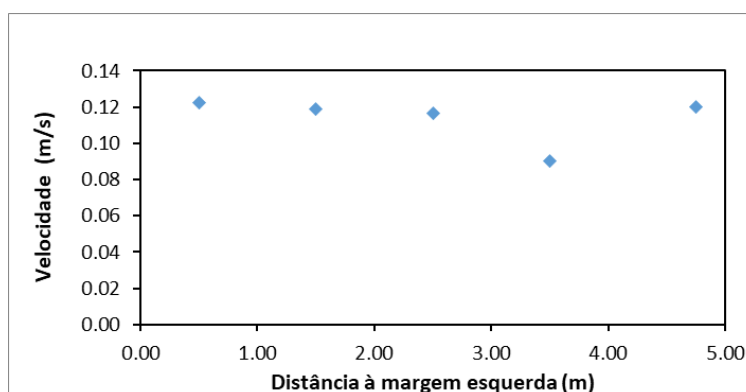


Figura 6.2 – Valores das velocidades médias medidas com o ADCP em campo.

Examinando o gráfico das velocidades médias obtidas com o ADCP é possível verificar que estas são bastante regulares, à exceção da velocidade na quarta posição a 3.5 m da margem. Este valor fora do padrão pode estar relacionado com os erros mencionados anteriormente.

6.2.3 LSPIV

Terminado o ensaio com ADCP, deu-se início de imediato ao ensaio LSPIV. O drone foi posicionado paralelamente ao escoamento, a cerca de 10 metros de altura, a gravação foi iniciada e os traçadores foram arremessados. A secção de análise definida foi uma de 9.5 m largura por 2 m de comprimento. No PIVlab utilizou-se o filtro Clahe com uma intensidade 20 e também o Highpass com uma intensidade 15. No Fudaa a secção obtida é a mesma e como já foi referido o pré processamento é mais automático, pois o *software* faz a filtragem de imagens autonomamente. Como a secção é simétrica o estudo concentrou-se na metade direita.

Na Figura 6.3 encontram-se uma das imagens utilizadas, para cada traçador, na análise. Na Figura 6.4 encontram-se as velocidades superficiais obtidas no PIVlab, com os três traçadores utilizados, bem como as velocidades médias fornecidas pelo ADCP.

a)



b)



c)



Figura 6.3 – Imagens de cada traçador analisado neste ensaio em que a) corresponde à análise com o traçador de 1 cm de lado, b) com o traçador de 2 cm de lado e c) com o traçador de 4 cm de lado.

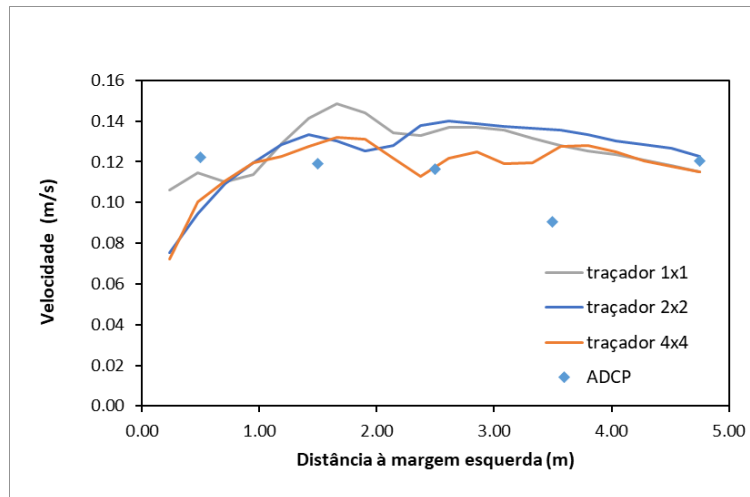


Figura 6.4 – Comparação dos valores de velocidade média obtidos com o ADCP e os valores de velocidade superficial obtidos com o PIVlab.

Observando as velocidades superficiais adquiridas com o PIVlab, pode-se concluir que estes resultados são bastante regulares e relativamente superiores às velocidades médias obtidas com o ADCP. Os formatos dos gráficos de velocidade superficial são muito parecidos aos obtidos em laboratório, onde a velocidade superficial cresce no início da secção e depois tende a manter-se constante à medida que caminha para o centro da secção. As velocidades superficiais obtidas com os traçadores de 1 e 2 cm de lado são bastante parecidas e um pouco superiores às velocidades obtidas com o traçador de 4 cm de lado. A partir destes resultados pode-se concluir que a diferença de tamanhos entre estes traçadores não é muito relevante pois as velocidades fornecidas são muito semelhantes.

Na Figura 6.5 estão representadas as velocidades superficiais conseguidas com o Fudaa. Na conversão de metros para pixels o Fudaa apresentou um erro médio de 8.3% e o PIVlab um erro médio de 7.8%.

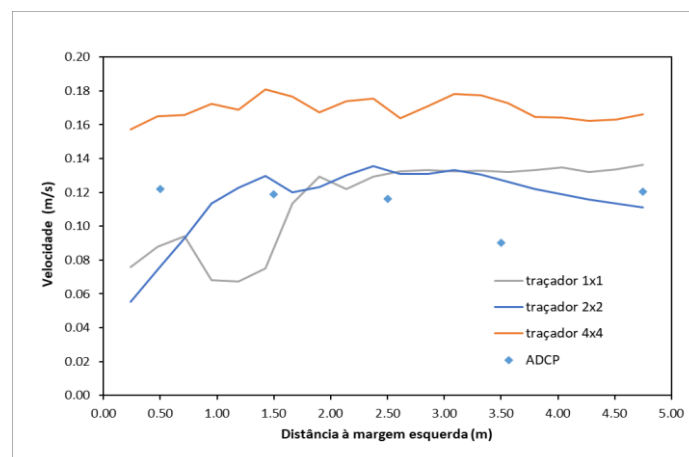


Figura 6.5 – Comparação dos valores de velocidade média obtidos com o ADCP e os valores de velocidade superficial obtidos com o Fudaa.

Comparando as velocidades superficiais obtidas para cada um dos traçadores com as velocidades médias fornecidas pelo ADCP, é possível constatar que o traçador quadrangular de 4 cm de lado é o que apresenta valores de velocidade mais adequados. Dos três utilizados, o traçador de 4 cm de lado é o que se visualiza melhor nas gravações. É possível que devido a isso o *software* analise mais eficazmente as velocidades superficiais. Contudo, os traçadores de 1 e 2 cm de lado apresentam velocidades superficiais relativamente superiores às velocidades médias do ADCP e bastante parecidas às velocidades obtidas com o PIVlab. A partir dos ensaios realizados até ao momento não seria de esperar que o traçador de 4 cm de lado fosse o que conseguisse velocidades superficiais superiores devido às suas dimensões.

Assumindo que as velocidades médias adquiridas com o ADCP são as corretas, utilizando o método da secção-velocidade, o caudal resultante do escoamento é de 1.12 m³/s.

A partir do enquadramento teórico e dos resultados conseguidos em laboratório, espera-se que o coeficiente teórico aplicado às velocidades superficiais seja 0.9. As paredes que constituem o solo do escoamento são de betão, logo, segundo os resultados do ensaio na secção simples trapezoidal efetuado em laboratório, espera-se que o coeficiente esteja entre 0.9 e 1. Como estamos em condições de campo existe alguma vegetação no fundo do escoamento o que provoca uma maior diferença entre a velocidade média e a superficial. Por isso optou-se por um valor de coeficiente de 0.9. No Quadro 6.2 encontram-se os caudais calculados nos dois *softwares* de análise LSPIV, depois de aplicado o coeficiente teórico às velocidades superficiais.

Quadro 6.2 – Comparação entre o caudal calculado com o ADCP e com LSPIV, utilizando um coeficiente teórico de 0.9.

Traçador [cm ²]	Caudal calculado com o ADCP [l/s]	Caudal calculado com o LSPIV [l/s]	Erro [%]	Software
1x1	1115.61	1089.33	2.41	Fudaa
		1162.46	4.20	PIVlab
2x2		1081.11	3.19	Fudaa
		1160.26	4.00	PIVlab
4x4		1521.77	26.69	Fudaa
		1088.77	2.39	PIVlab

Como é possível visualizar, o erro obtido com o coeficiente teórico de 0.9 é bastante reduzido, à exceção do caudal calculado com o traçador de 4 cm de lado no Fudaa. O PIVlab apresenta um erro médio de 2.67%, o que é bastante satisfatório. O erro obtido com o traçador de 4 cm de lado no Fudaa é elevado porque as velocidades superficiais obtidas são muito superiores comparativamente às restantes. O valor do coeficiente aplicado a essas velocidades teria de ser muito inferior de modo a obter um erro menor. A partir destes resultados é possível afirmar que o LSPIV é um método eficaz na medição de caudais. Tanto as velocidades superficiais como o caudal previsto são próximas das conseguidas com o ADCP.

No Quadro 6.3 apresentam-se os coeficientes práticos que seria necessário aplicar às velocidades superficiais para obter as velocidades médias na altura. A partir destas velocidades e através da área da secção é possível calcular novamente o caudal do escoamento.

Quadro 6.3 – Coeficientes práticos aplicados às velocidades superficiais de modo a obter o caudal do escoamento.

Traçador [cm ²]	Coeficiente PIVlab	Coeficiente Fudaa
1x1	0.864	0.922
2x2	0.865	0.929
4x4	0.895	0.660

O valor médio do coeficiente prático, obtido com os três traçadores, no PIVlab é 0.875. Este valor é bastante próximo do previsto e inferior a 0.990, que corresponde ao valor do coeficiente prático na secção simples trapezoidal testado em laboratório. No Fudaa o valor médio é 0.837, comparando este valor com o 0.805, que corresponde ao coeficiente prático obtido em laboratório na secção simples trapezoidal, é possível afirmar que este não vai de encontro com o expectável. Mesmo que não se contabilize o coeficiente prático obtido com o traçador de 4 cm para a média, o seu valor continua a ser superior ao conseguido na secção simples trapezoidal. Apesar de existir uma grande diferença na altura de água de um ensaio para o outro, o que também influencia no coeficiente, o valor do coeficiente em campo deveria ser inferior ao do laboratório. A rugosidade de fundo em campo é muito superior à de laboratório devido ao desgaste do betão e à existência de vegetação o que provoca uma maior diferença entre a velocidade média e a superficial.

Por último comentar a facilidade de aplicação do método LSPIV para a medição de velocidades comparativamente ao ADCP. Para medir as velocidades de escoamento com o ADCP foi necessário efetuar uma série de procedimentos e tomar certas precauções para ser possível usar o aparelho. Para a medição ser exequível e com resultados aceitáveis foram necessários três operadores. Outra desvantagem é o tempo de medição do ensaio. Em média gastou-se cerca de 15 min a operar o ensaio com o ADCP. Com o LSPIV apenas foram necessárias duas pessoas e o ensaio durou cerca de 5 min contabilizando a análise dos três traçadores.

7 Conclusões e trabalhos futuros

A utilização do método LSPIV para a quantificação de caudais em cursos de água foi o principal tema da presente dissertação. De uma forma geral, concluiu-se que este método permite uma avaliação simples e rápida dos caudais, apresentado vários pontos positivos quando comparada com os aparelhos usados atualmente. Todavia existem várias considerações a ter em conta na aplicação do método.

Em relação aos dois *softwares* testados, PIVlab e Fudaa, concluiu-se que o PIVlab é o melhor *software* para aplicar o método LSPIV. Observando os valores de velocidade superficial adquiridos e os coeficientes práticos necessários aplicar a essas velocidades em cada escoamento, é possível verificar uma correlação e coerência nos resultados de ensaio para ensaio. Os gráficos de velocidade superficial com o PIVlab foram sempre semelhantes e relativamente superiores (conforme expectável) à velocidade média obtida com o ADV. Com o Fudaa o mesmo não acontece, apesar do formato dos gráficos serem similares os valores das velocidades nem sempre são os esperados. Por vezes fornece velocidades superficiais inferiores às do ADV ou então muito superiores. Estes resultados podem ser justificados pelo erro associado na conversão de metros para pixels apresentado pelo *software*. Em média o Fudaa teve um erro de conversão de 16.29%. O menor erro de conversão foi no ensaio respeitante secção composta e mesmo assim os resultados adquiridos não foram de encontro com o expectável. Para além disso para obter uma conversão de metros para pixels aceitável no Fudaa é necessário definir pelo menos três pares de pontos, enquanto com o PIVlab um é suficiente. Relativamente à facilidade de utilização, o PIVlab é um *software* mais prático, fácil de aplicar e intuitivo comparativamente ao Fudaa. Outra vantagem do PIVlab é a rapidez a fornecer resultados. O Fudaa exige um esforço computacional muito maior levando a que uma análise com um maior número de imagens seja mais demorada. Devido às razões apresentadas, considera-se que o PIVlab é o melhor *software* a aplicar o método LSPIV. As conclusões seguintes terão como base os resultados provenientes do PIVlab.

Sobre os traçadores utilizados nos vários ensaios, chegou-se à conclusão que os quadrangulares, com um máximo de 4 cm de lado, permitem uma representação eficaz do escoamento superficial. Embora em laboratório não tenham sido alcançados os melhores resultados com estes traçadores, no ensaio de campo forneceram dados bastante aceitáveis. A grande diferença entre os ensaios laboratoriais e os de campo foi o local de arremesso dos traçadores. Em laboratório os traçadores foram colocados na superfície da água desde uma das laterais e quase ao mesmo nível da água. A partir deste posicionamento é bastante difícil garantir uma boa densidade e uniformidade de traçadores na secção. No ensaio de campo os traçadores foram arremessados a partir de uma ponte, a cerca de 5 metros acima do nível de água, o que permitiu atirar vários traçadores de uma vez sem correr o risco de haver grande sobreposição. Nos ensaios em laboratório o poliestireno, sendo mais fácil de arremessar, forneceu também melhores resultados. Contudo, foi possível verificar que quanto maior as velocidades superficiais, mais difícil era garantir a uniformidade do poliestireno na secção em análise. Como o poliestireno têm dimensões reduzidas tem tendência a agrupar-se devido a tensão superficial da água. Logo, quanto maior for a velocidade superficial esperada e maior for a turbulência

maior deverá ser o traçador. De frisar que uma boa densidade e uniformidade de colocação de traçadores é essencial para adquirir bons resultados com o método LSPIV.

Por último, mencionar o comportamento do coeficiente aplicado às velocidades superficiais com o objetivo de obter as velocidades médias na altura. No geral, em todos os casos de estudo realizados o coeficiente aumentou com o crescimento do raio hidráulico. O seu valor só não aumentou no ensaio à secção composta com o caudal de 58.9 l/s. No entanto, observando as características do escoamento pode-se constatar que a velocidade média no leito principal desse ensaio é a menor dos três caudais testados. No ensaio da secção composta foi também possível observar uma diferença de velocidades superficiais entre o leito de cheia e o leito principal, comparativamente às velocidades médias conseguidas com o ADV. Sendo a rugosidade de fundo superior no leito de cheia e a altura de água inferior, o coeficiente necessário aplicar no leito de cheia para obter as velocidades médias em altura foi bastante menor em relação ao aplicado no leito principal. Ou seja, quanto maior a rugosidade de fundo e menor a altura de água, menor será o coeficiente. Nos ensaios realizados às duas secções simples, esta teoria também se aplicou. A rugosidade de fundo foi constante e apenas foi variada a altura de água em ambas as secções. Finalizando, para secções com baixa rugosidade, como betão polido, é possível admitir que o coeficiente está entre 0.95 e 1. Para secções com maior rugosidade de fundo como brita, seixos ou vegetação o coeficiente encontra-se entre 0.85 e 0.95.

Em suma, é possível confirmar o LSPIV como uma boa alternativa para a medição de velocidades em cursos de água e, desta forma, uma boa possibilidade para a estimativa do caudal. Nos casos examinados nesta dissertação, o LSPIV apresentou um erro médio de 5% no cálculo do caudal, em que a previsão do coeficiente foi efetuada através de estudos até agora realizados. Em Portugal este é o primeiro estudo executado ao LSPIV, por isso espera-se no futuro, com mais informações e mais estudos efetuados, que o método se torne mais exato e preciso. Aplicar o método LSPIV para medição de velocidades superficiais, comparativamente ao ADCP e ao ADV, é muito mais fácil, menos demorado e menos trabalhoso. Para além disso, o método não é intrusivo e pode ser aplicado numa maior variedade de situações em que não seria possível medir com aparelhos tradicionais.

Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação do LSPIV em cursos de água com condições mais adversas, com secções de escoamento e rugosidades diferentes de modo a verificar se mesmo assim o método é eficaz. O objetivo é determinar o caudal sem recorrer a nenhum dos métodos convencionais usados atualmente. Hoje em dia o LSPIV ainda está dependente da medição da batimetria, porém já existem trabalhos onde a mesma é prevista através da turbulência existente no curso de água. De salientar ainda que o custo da realização deste método é bastante reduzido comparativamente aos métodos aplicados de momento. Outra vantagem é o tempo reduzido na aplicação do método e a facilidade de execução. Espera-se no futuro que o *software* consiga captar as velocidades superficiais a partir dos traçadores naturais existentes na superfície de água, de maneira a não ser necessário adicionar traçadores artificiais, não interferindo com o ecossistema.

8 Referências

- Aguiar, J. (2011). *Vazão em Rios*. <https://www.jorcyaguiar.com/2011/04/vazao-em-rios.html>
- Aya, S., Fujita, I., & Yagyu, M. (1995). Field-Observation of Flood in a River by Video Image Analysis. *Proceedings of Hydraulic Engineering*. <https://doi.org/10.2208/prohe.39.447>
- Boiten, W. (2003). Hydrometry (IHE Delft Lecture Note Series). In *AA Balkema*. 256. <https://doi.org/10.1201/9780203971093>
- Bousmar, D., Rivière, N., Proust, S., Paquier, A., Morel, R., & Zech, Y. (2005). Upstream Discharge Distribution in Compound-Channel Flumes. *Journal of Hydraulic Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2005\)131:5\(408\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:5(408))
- Bradley, A. A., Kruger, A., Meselhe, E. A., & Muste, M. V. I. (2002). Flow measurement in streams using video imagery. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2002wr001317>
- Cunha, P. N. B. D. E. (2010). *Medição de Caudais em rios Métodos Tradicionais versus Novos Equipamentos. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.*
- Fujita, I., Aya, S., & Deguchi, T. (1997). Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle. *Proceedings, Congress of the International Association of Hydraulic Research, IAHR*.
- Fujita, I., & Komura, S. (1994). Application of Video Image Analysis for Measurements of River-Surface Flows. *Proceedings of Hydraulic Engineering*. <https://doi.org/10.2208/prohe.38.733>
- Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221689809498626>
- Genç, O., Ardiçlioğlu, M., & Ağıralioğlu, N. (2015). Calculation of mean velocity and discharge using water surface velocity in small streams. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.013>
- Hauet, A., Morlot, T., & Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. *E3S Web of Conferences*, 40. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006015>
- Jodeau, A. M., Hauet, A., & Coz, J. Le. (2018). *Fudaa-LSPIV Version 1.6.4 User Manual*. [https://forge.irstea.fr/attachments/download/2791/Fudaa-LSPIV User Manual.pdf](https://forge.irstea.fr/attachments/download/2791/Fudaa-LSPIV%20User%20Manual.pdf)
- Kaiwei Chen. (2018). *Application of Large-Scale Particle Image Velocimetry At the Hydraulics Laboratory of Colorado State University*. 90.
- Kim, Y. (2006). Uncertainty analysis for non-intrusive measurement of river discharge using image velocimetry. *PhD Thesis, The University of Iowa*.
- Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., & Dramais, G. (2012). Uncertainty in open-channel discharges

- measured with the velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.05.001>
- Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 46(4), 1–14.
<https://doi.org/10.1029/2008WR006950>
- Muste, Marian, Xiong, Z., Schöne, J., & Li, Z. (2004). Validation and extension of image velocimetry capabilities for flow diagnostics in hydraulic modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:3\(175\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:3(175))
- Polatel, C. (2005). Indexing by free surface velocity: A prospect for remote discharge estimation. *31st IAHR Congress 2005: Water Engineering for the Future, Choices and Challenges*.
- Quintela, A. (1981). *Hidráulica* (Coleção d). Fundação Calouste Gulbenkian.
- Resolução da Assembleia da República. (1998). *Convenção sobre Cooperação para a Protecção e o Aproveitamento Sustentável das Águas das Bacias Hidrográficas Luso-espanholas*. 29.
<https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*.
<https://doi.org/10.5334/jors.bl>
- United States Geological Survey. (2018). *Guidelines for the collection of video for Large Scale Particle Velocimetry (LSPIV) - OSW Surface Velocity Workgroup - myUSGS Confluence*.
<https://my.usgs.gov/confluence/pages/viewpage.action?pageId=546865360>