

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS EM CANAIS COM VEGETAÇÃO

PEDRO MIGUEL CAMPOS FERNANDES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia

Co-Orientador: Professor Doutor João Pedro Gomes Moreira Pêgo

SETEMBRO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012- Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meu Avô
A meus Pais

“O ser humano está num dilema pela simples razão de que ele não é apenas inteligente, ele está também ciente da sua inteligência. Isto é algo único do homem – o seu privilégio, a sua prerrogativa, a sua glória –, mas pode muito facilmente tornar-se a sua agonia.”

Osho

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto sob a orientação do Professor Rodrigo Maia e co-orientação do Professor João Pedro Pêgo, a quem agradeço todo o apoio e conhecimento que me foi transmitido. O tema desta dissertação insere-se no projeto de investigação “Estudo de escoamentos em canais com vegetação”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do contrato PTDC/ECM/099752/2008. O autor agradece o apoio financeiro para a realização do trabalho de investigação aqui apresentado.

Ao Tiago Silva agradeço a companhia, o empenho, a ajuda e o apoio dado durante todo o processo laboratorial.

Agradeço ao Luís e ao Rui pela ajuda e companhia, no decurso do período laboratorial do trabalho.

Sem querer individualizar, com medo de deixar de fora alguém, agradeço de uma forma muito especial a todos os meus amigos que me acompanharam em todos os momentos e me ajudaram a atingir um objetivo na minha vida, sem a vossa presença nada teria conseguido.

À minha mãe, ao meu pai e à minha irmã agradeço por tudo o que me transmitiram e pela pessoa que sou hoje.

E por último, um agradecimento muito sentido ao meu avô Campos, que partiu já no período de conclusão deste trabalho, deixando um legado que perdurará.

RESUMO

A vegetação presente em canais, rios e planícies de inundação foi considerada, durante muito tempo, como uma fonte de resistência ao escoamento, e como tal, eliminada de forma a melhorar a circulação da água. No entanto, nos últimos anos, a vegetação deixou de ser entendida apenas como uma obstrução ao movimento da água, mas também como um meio de proporcionar estabilidade a margens e canais e de reabilitar morfológica e ecologicamente cursos de água, devido à influência que tem no escoamento, como por exemplo, a resistência hidráulica que origina.

O objetivo da presente dissertação é compreender e analisar o escoamento sobre fronteiras com vegetação emersa rígida, de forma a contribuir para o desenvolvimento de um modelo conceptual. Para atingir o objetivo proposto, foi simulado nas condições de escoamento semelhantes às que se encontram no meio natural, uma distribuição aleatória das hastes com diferente densidade ao longo do canal. O trabalho prático consistiu na medição de velocidades instantâneas utilizando Anemometria Laser-Doppler (LDA), de modo a permitir compreender a distribuição de velocidades de um escoamento em canal revestido com vegetação e quantificar a força resistente ao escoamento.

Os resultados obtidos permitiram concluir que os elementos de vegetação influenciam o escoamento no espaço entre hastes, onde as forças resistentes ao escoamento assumem uma ordem de grandeza superior às mesmas num escoamento sem a presença de vegetação.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de margens, canais com vegetação, tensões turbulentas, Anemometria Laser-Doppler.

ABSTRACT

The vegetation present in the channels, rivers and floodplains has been considered, for a long time, as a source of flow resistance, and as such, eliminated to improve the water circulation. Although, during the last years, the vegetation was no longer understood as just an obstruction to the water movement, but also as a way to provide stability to the banks and channels and to rehabilitate morphologic and ecologically the water courses, due the influence that it has in the flow, as for example the hydraulic resistance that it creates.

The aim of this thesis is to understand and to analyze the flow over borders with rigid emerged vegetation, so as to contribute for the development of one conceptual model. In order to reach the proposed aim, it was simulated the flow condition as found in the natural environment, with random distribution of stems and different density along the channel. The practical work consisted of the measure of the instantaneous velocity, using the technology Laser-Doppler Anemometry in order to understand the distribution of the velocities of a flow in channels lined with vegetation and to quantify the flow-resistant force.

The obtained results allowed concluding that the vegetation elements affect the flow in space among stems, where the flow-resistant forces assume an order of magnitude higher than the same forces in a flow without the presence of vegetation.

KEYWORDS: Stabilization of banks, channels with vegetation, turbulent stresses, Laser-Doppler Anemometry.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVO	1
1.3. METODOLOGIA	1
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
 2. ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE	 3
2.1. ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE	3
2.2. ESCOAMENTOS TURBULENTOS	4
2.2.1. EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES	4
2.2.2. EQUAÇÕES <i>REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES</i> (RANS)	5
2.3. ESCOAMENTOS COM VEGETAÇÃO	5
2.3.1. EQUAÇÕES <i>DOUBLE-AVERAGED NAVIER-STOKES</i>	6
2.4. RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO	9
2.4.1. TEOREMA DA QUANTIDADE DO MOVIMENTO	9
 3. CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	 13
3.1. INTRODUÇÃO	13
3.2. INSTALAÇÃO LABORATORIAL	13
3.3. INSTRUMENTAÇÃO	15
3.4. O SISTEMA <i>LASER DOPPLER ANEMOMETRY</i> (LDA)	16
3.4.1. ONDA DE LUZ E SUA PROPAGAÇÃO	16
3.4.2. EFEITO DOPPLER	17
3.4.3. SOBREPOSIÇÃO DE DUAS ONDAS DE LUZ	18
3.4.4. PRINCÍPIO DO LDA	21
3.4.5. INTERFERÊNCIAS DOS RAIOS LASER NO VOLUME DE MEDIÇÃO	22
3.4.6. MÉTODO DA ALTERAÇÃO DA FREQUÊNCIA	23

3.4.7. TAMANHO DO VOLUME DE MEDIÇÃO.....	25
3.5. VELOCIDADES INSTANTÂNEAS/MÉDIAS	26
3.6. CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS PRELIMINARES.....	28
3.6.1. FUNDO DO CANAL	28
3.6.2. POSIÇÕES DAS MEDIÇÕES NO CANAL.....	30
3.6.3. ZONAS DE MEDIÇÃO	33
3.6.4. ENSAIOS PRELIMINARES	34
3.6.4.1. Primeiros Ensaios.....	35
3.6.4.2. Primeira correção ao modelo.	37
3.6.4.3. Segunda correção ao modelo.....	38
3.6.4.4. Terceira correção ao modelo	38
3.7. CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DEFINITIVOS	40
3.7.1. LEITO DO CANAL.....	41
3.7.2. ZONAS DE MEDIÇÃO	42
3.7.3. CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO	43
 4. CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES.....	 45
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	45
4.2. PERFIS DAS VELOCIDADES MÉDIAS TEMPORAIS	46
4.2.1. PERFIS TRANSVERSAIS DA VELOCIDADE MÉDIA TEMPORAL.....	46
4.2.2. PERFIS VERTICAIS DA VELOCIDADE MÉDIA TEMPORAL	50
4.2.3. <i>CONTOUR MAPS</i>	58
 5. EFEITO DA VEGETAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO.....	 63
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	63
5.2. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM CANAL COM VEGETAÇÃO	63
5.2.1. INTEGRAÇÃO DAS ZONAS DE MEDIÇÃO	63
5.2.2. FORÇAS INTERVENIENTES NO ESCOAMENTO	65
5.2.3. FORÇA RESISTENTE AO ESCOAMENTO	66
5.3. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM CANAL SEM VEGETAÇÃO.....	67
5.3.1. PRINCÍPIO TEÓRICO PARA DEFINIÇÃO DO ESCOAMENTO	67
5.2.3.1. Cálculo das Características do Escoamento	69
5.2.3.2. Força Resistente ao Movimento.....	70
5.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	71

6. CONCLUSÕES	73
BIBLIOGRAFIA	75
7. ANEXOS	77

ÍNDICE FIGURAS

Figura 2.1 – Leito de um rio, exemplo de escoamento com superfície livre. [1].....	3
Figura 2.2 – Zona húmida com uma densidade aleatória de vegetação.[2].....	6
Figura 2.3 – Esquema da aplicação do teorema [J. Novais-Barbosa, 1986].....	10
Figura 3.1 - Vista geral do canal hidráulico.....	13
Figura 3.2 - Desenho esquemático de parte do circuito hidráulico do canal do laboratório.....	14
Figura 3.3 - Componentes da instalação laboratorial: a) comporta basculante; b) válvula de regulação do caudal; c) caudalímetro digital.....	14
Figura 3.4 - Sonda do laser (à esquerda), foto-detetor (em cima à direita) e cabeça do laser (em baixo à direita).....	16
Figura 3.5 - Transmissão de um feixe luminoso de um meio para outro [Zhang, 2010].	17
Figura 3.6 - Sobreposição de duas ondas luminosas [Zhang, 2010].....	19
Figura 3.7 - Movimento da partícula através do volume de medição [Zhang, 2010].....	21
Figura 3.8 - Interferência dos raios laser no volume de medição (em cima) e o sinal “Doppler Burst” [Zhang, 2010].	23
Figura 3.9 - Especificação do tamanho do Volume de Medição [Zhang, 2010].	25
Figura 3.10 – Janela do <i>software</i> BSA Flow Software.....	26
Figura 3.11 – Janela do <i>software</i> BSA Flow Software referente aos dados exportados.	27
Figura 3.12 – Representação do formato de armazenamento dos valores de velocidade medidos, nos ficheiros txt.	27
Figura 3.13 - Representação das sete placas de acrílico, furadas (pontos verdes), que constituem o fundo do canal.....	29
Figura 3.14 - Material usado para a construção do leito rugoso.....	29
Figura 3.15 - a) Esquema do fundo do canal sem as hastes; b) Fotografia da soleira a jusante; c) Esquema do canal sem vegetação e do perfil da soleira de seixo.	30
Figura 3.16 - Sistema do referencial de coordenadas x y z	30
Figura 3.17 - Medições realizadas ao longo do eixo dos yy	31
Figura 3.18 - Exemplo da influência da refração na posição $y = 50\text{mm}$	32
Figura 3.19 - Zonas de medição ao longo do eixo dos zz	33
Figura 3.20 - Pormenor para as zonas longitudinais definidas para as medições.	34
Figura 3.21 - Canal sem presença de vegetação. Ensaio Preliminares.	34
Figura 3.22 - Perfis verticais da componente longitudinal da velocidade para a secção $y = 133\text{mm}$, nas várias posições longitudinais.....	35
Figura 3.23 - Perfis Verticais da componente longitudinal da velocidade para a secção $y = 0\text{mm}$, nas diferentes posições longitudinais.	36
Figura 3.24 - Perfil Transversal da componente longitudinal da velocidade para uma altura de $Z=32\text{mm}$, na posição longitudinal $X=5465\text{mm}$	36
Figura 3.25 - Perfis transversais da componente longitudinal da velocidade, para uma altura de $Z=32\text{mm}$, nas posições $X=8516\text{mm}$ (em cima, à esquerda), $X=8669\text{mm}$ (em cima, à direita) e $X=8771\text{mm}$ (em baixo).	37
Figura 3.26 - Perfil transversal da componente longitudinal da velocidade, para a altura $Z=32\text{mm}$, na primeira posição $X=8669\text{mm}$, após a primeira correção ao modelo.	37
Figura 3.27 - Perfil transversal da componente longitudinal da velocidade para altura $Z=32\text{mm}$, na posição $X=8669\text{mm}$, após a segunda correção ao modelo.....	38
Figura 3.28 - Perfil vertical da componente longitudinal da velocidade, na secção $Y=133\text{mm}$, para a posição $X=8516\text{mm}$ (em cima, à esquerda), $X=8669\text{mm}$ (em cima, à direita) e $X=8771\text{mm}$ (em baixo), após as correcções ao modelo.	39

Figura 3.29 - Perfis transversais da componente longitudinal da velocidade para a altura $Z=32\text{mm}$, nas posições $X=8669\text{mm}$ (em cima à esquerda), $X=8516\text{mm}$ (em cima à direita) e $X=8771$ (em baixo), depois das correções ao modelo.	40
Figura 3.30 - Canal de ensaios com a presença de hastes.	40
Figura 3.31 - Haste metálica utilizada para simular vegetação rígida.	41
Figura 3.32 - a) Esquema do canal com vegetação rígida; b) Pormenor das hastes na placa de fundo.	41
Figura 3.33 - Soleira de jusante e canal com vegetação rígida – vista de jusante (esquerda); Vegetação rígida – vista de cima (direita, canto superior); Vista frontal do canal do laboratório (direita, canto inferior).	42
Figura 3.34 - Secção transversal do canal e malha dos pontos de medição definidos.	43
Figura 3.35 - Altura de escoamento nas diferentes secções críticas do canal.	43
Figura 4.1 – Perfis transversais da Velocidade longitudinal média: a) para $x=8.516\text{m}$ (Z1), b) para $x=8.669\text{m}$ (Z2).	47
Figura 4.2 – Perfis transversais da velocidade longitudinal média: a) para $x=8.771\text{m}$ (Z3), b) para $x=9.025\text{m}$ (Z4).	48
Figura 4.3 – Perfis transversais da velocidade longitudinal média: a) para $x=9.178\text{m}$ (Z5), b) para $x=9.208\text{m}$ (Z6).	49
Figura 4.4 – Perfis verticais da velocidade média temporal de Z1 para: $y = 133\text{mm}$, $y = 106,4\text{mm}$ e $y = -133\text{mm}$	51
Figura 4.5 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z2 para: $y = 0\text{mm}$, $y = 13,3\text{mm}$ e $y = -119,7\text{mm}$	52
Figura 4.6 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z3 para: $y = 133\text{mm}$, $y = 79,8\text{mm}$ e $y = -172,9\text{mm}$	53
Figura 4.7 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z4 para: $y = 133\text{mm}$, $y = 39,9\text{mm}$ e $y = -159,6\text{mm}$	55
Figura 4.8 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z5 para: $y = 146,3\text{mm}$, $y = -26,6\text{mm}$ e $y = -146,3\text{mm}$	56
Figura 4.9 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z6 para: $y = 172,9\text{mm}$, $y = 159,6\text{mm}$ e $y = -13,3\text{mm}$	57
Figura 4.10 – <i>Contour map</i> para a zona de medição situada antes do início da região com hastes, $x = 5,915\text{m}$ (Z0).	58
Figura 4.11 – <i>Contour map</i> para a posição: a) $x = 8,516\text{m}$ (Z1), b) $x = 8,669\text{m}$ (Z2), c) $x = 8,771\text{m}$ (Z3).	59
Figura 4.12 – <i>Contour map</i> para a posição: a) $x = 9,025\text{m}$ (Z4), b) $x = 9,178\text{m}$ (Z5) e c) $x = 9,280\text{m}$ (Z6).	60
Figura 5.1 – Integração de Z0.	63
Figura 5.2 – Integração de: a) Z1, b) Z2, c) Z3, d) Z4, e) Z5 e f) Z6.	64
Figura 5.3 – Curva de Regolfo teórica criada a montante da soleira.	67

ÍNDICE TABELAS

Tabela 1 - Valores de Y afetados pelo fenómeno de refração.	32
Tabela 2 – Características do escoamento em cada zona de medição.	45
Tabela 3 – Cálculo da força resistente ao escoamento.	66
Tabela 4 – Cálculo de K_s	69
Tabela 5 – Cálculo das alturas de escoamento.	70
Tabela 6 – Cálculo da força resistente ao escoamento.	71

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A_f	– área ocupada pelo fluido – [m ²]
A_0	– área total – [m ²]
g	– aceleração gravítica – [m/s ²]
H	– altura do escoamento influenciado pelas hastes – [m]
h	– altura do escoamento – [m]
K_s	– coeficiente de rugosidade de Strickler – [m ^{1/3} /s]
p	– pressão local instantânea – [N/m ²]
$\bar{p}$	– pressão média temporal – [N/m ²]
p'	– flutuação turbulenta da pressão - [N/m ²]
$\langle \bar{p} \rangle$	– pressão média temporal e espacial - [N/m ²]
Q	– caudal – [m ³ /s]
S_{int}	– superfície ocupada pelo leito na área de controlo – [m ²]
t	– tempo – [s]
u	– componente da velocidade instantânea na direção longitudinal – [m/s]
$\bar{u}$	– velocidade longitudinal média temporal – [m/s]
u'	– flutuação turbulenta da velocidade longitudinal – [m/s]
$\langle \bar{u} \rangle$	– velocidade longitudinal média temporal e espacial – [m/s]
x	– distância longitudinal – [m]
y	– distância transversal – [m]
z	– distância vertical – [m]
Δs	– distância – [m]
Δt	– intervalo de tempo – [s]
μ	– viscosidade dinâmica da água – [kg m ⁻¹ s ⁻¹]
ν	– viscosidade cinemática da água – [m ² s ⁻¹]
ρ	– massa volúmica da água – [kg m ⁻³]

1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

O Homem desde as primeiras civilizações tem vindo a explorar e domar rios, margens e planícies de inundação, com uma crescente procura por eficácia técnica, tentando determinar quais os fatores que afetam o fluxo da água.

A vegetação emersa que cobre as margens, planícies de inundação e fundo de muitos cursos fluviais, é um factor muito importante no equilíbrio dos ecossistemas fluviais, devido à sua influência nos processos hidrológicos e geomorfológicos, desempenhando um papel positivo para a biodiversidade e qualidade da água.

A presença de vegetação num escoamento altera as condições hidrodinâmicas do mesmo [Kadlec, 1995], tendo, nomeadamente, impacto na resistência hidráulica [Yen, 2002] e na turbulência [Nepf, 1999].

Num curso de água com maior resistência hidráulica, o risco de inundação é maior [Kadlec, 1990], sendo assim, de extrema importância, compreender o comportamento e a fenomenologia de escoamentos condicionados pela presença de vegetação, tanto para aplicações ecológicas como de engenharia.

Os vários estudos laboratoriais, de campo e numéricos, que têm vindo a ser desenvolvidos, procuram contribuir para o desenvolvimento de novas ferramentas que permitam compreender a complexidade hidrodinâmica deste tipo de escoamentos, sendo já um problema antigo e que ainda hoje não é completamente conhecido.

1.2. OBJETIVO

No presente estudo pretende-se i) contribuir para o desenvolvimento de um modelo conceptual de escoamento sobre fronteiras com vegetação emersa rígida e ii) quantificar as forças resistentes ao escoamento exercidas pelas hastes e fundo do canal.

1.3. METODOLOGIA

O trabalho realizado baseia-se nos princípios fundamentais da hidrodinâmica de escoamentos turbulentos, caracterizando o escoamento em secções de controlo definidas.

O trabalho experimental resume-se em simular laboratorialmente um escoamento em leito com vegetação emersa rígida, sendo efetuada a medição de velocidades do escoamento recorrendo a uma instrumentação não intrusiva, o LDA.

Com base nas medições, calcularam-se as forças resistentes ao escoamento e foi feita uma discussão no sentido de entender o comportamento hidrodinâmico no interior do escoamento.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 2 – exhibe uma análise sobre trabalhos realizados no âmbito de escoamentos com vegetação. Apresenta o conceito da metodologia *Double-Averaged* e o desenvolvimento das equações do movimento
- Capítulo 3 – apresenta as instalações laboratoriais e a instrumentação laboratorial utilizada. Descreve detalhadamente o sistema LDA.
- Capítulo 4 – caracteriza os ensaios laboratoriais e o procedimento experimental adotado
- Capítulo 5 – apresenta o tratamento de dados realizado para obter os vários perfis da velocidade média.
- Capítulo 6 – caracteriza o efeito da vegetação na resistência ao escoamento.
- Capítulo 7 – expõe as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2

ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE

2.1. ESCOAMENTOS EM SUPERFÍCIE LIVRE

Nos escoamentos em rios ou em canais, há sempre contacto da corrente líquida com um meio exterior gasoso, a atmosfera, sendo designados como escoamentos com superfície livre (Figura 2.1). A superfície de contacto entre os dois meios fluidos designa-se por superfície livre, mantendo-se as pressões constantes e iguais às exercidas pelo meio gasoso [J. Novais-Barbosa, 1985].

Considerando as condições fronteiras referidas, imagine-se que um fluido, partindo do repouso, começa a deslocar-se com velocidades gradualmente crescentes.



Figura 2.1 – Leito de um rio, exemplo de escoamento com superfície livre. [1]

Numa situação inicial, quando os valores da velocidade são pequenos, as tensões tangenciais presentes devem-se à resistência do fluido ao escoamento, ou seja, as tensões predominantes são de natureza viscosa. As linhas de corrente constituem um campo perfeitamente regulado e estável, estando a trajetória da partícula no fluido completamente individualizada, implicando que qualquer perturbação

induzida no escoamento é rapidamente amortecida. O regime exposto é denominado de regime laminar [J. Novais-Barbosa, 1985].

Este regime apresenta como principais características a forma ordenada do escoamento e o facto de o fluido se deslocar dividido em camadas individuais que nunca se misturam entre si, correspondendo a números de Reynolds reduzidos. O perfil de velocidades apresenta uma distribuição parabólica ao longo da normal ao sentido do escoamento, situando-se a velocidade máxima no centro da normal considerada. As condições fronteira são especialmente simples e as equações gerais do movimento dos fluidos são suscetíveis de simplificação neste tipo de escoamentos. [J. Novais-Barbosa, 1985]

Considerando o aumento progressivo das velocidades do fluido, a configuração laminar começa a apresentar instabilidade. Surge então um tipo de escoamento, chamado de transição. A instabilidade da solução laminar é o fator que caracteriza o movimento, no entanto o seu estudo pode continuar a ser feito com base nas mesmas equações do caso anterior. [J. Novais-Barbosa, 1985]

O regime de transições acontece quando há a passagem de um fluxo laminar para um turbulento, ou de um movimento turbulento para um laminar. Este fenómeno de transição deve-se ao facto de as linhas de corrente adquirirem uma curvatura originando vórtices, correspondendo a valores de número de Reynolds vizinhos do seu valor crítico (número que estabelece a transição de regime laminar para turbulento). Com a intensificação destas perturbações origina-se o regime turbulento ou por outro lado, caso haja uma dissipação das desordens, o regime laminar mantém-se. [J. Novais-Barbosa, 1985]

Mantendo o aumento progressivo da velocidade de escoamento, este transita de regime de transição para regime turbulento. Nesta transição de regime está implícito o desaparecimento total da estrutura laminar do escoamento, verificando-se a mistura entre diferentes camadas do fluido e a ocorrência de rápidas flutuações das grandezas no espaço e no tempo. [J. Novais-Barbosa, 1985]

2.2. ESCOAMENTOS TURBULENTOS

A turbulência é uma condição irregular do movimento tal que as diferentes grandezas em jogo apresentam bruscas variações no espaço e no tempo as quais, na impossibilidade de serem caracterizadas de outro modo, se consideram aleatórias [Hinze, 1959]. Estando já implícita na afirmação anterior, uma característica essencial dos escoamentos turbulentos é que o campo de velocidades do fluido varia significativa e irregularmente tanto em posição como em tempo [Pope, 2000].

2.2.1. EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

No estudo de escoamentos de fluidos, as equações Navier-Stokes expressam a conservação de quantidade de movimento por unidade de volume, tratando o fluido como um meio contínuo – *continuum hypothesis* [Pope, 2000]. Para estes casos, a equação Navier-Stokes escreve-se da seguinte forma [Pope, 2000]:

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2 U \quad (2.1)$$

onde, U e ρ são campos Eulerianos relativos à massa volúmica e velocidade respetivamente, $p = P + \rho\Psi$ refere-se à pressão modificada, $\nu = \mu/\rho$ é a viscosidade cinemática, e $\nabla = e_i \frac{\partial}{\partial x_i}$ é o operador gradiente.

2.2.2. EQUAÇÕES REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES (RANS)

A natureza determinística das equações de Navier-Stokes coloca em questão a sua compatibilidade com a aleatoriedade dos escoamentos turbulentos. A verdade é que as equações de Navier-Stokes conseguem descrever os detalhes dos campos de velocidades dos escoamentos turbulentos. Contudo, em engenharia, a quantidade de informação obtida acaba por inviabilizar a sua utilização [Pope, 2000].

Tendo em conta que nos regimes turbulentos, a velocidade e a pressão variam instantaneamente, os seus valores são inerentemente imprevisíveis. Podem ser então caracterizados através de média temporal e respetivas flutuações ao longo do tempo. Esta decomposição tem o nome de decomposição de Reynolds.

Considerando uma variável instantânea genérica, Θ , em conformidade com sistema de eixos adotado, o eixo do x é orientado ao longo do escoamento paralelo ao leito, y será orientado para a parede do canal, do lado esquerdo do sentido do escoamento, e o eixo do z é em sentido à superfície livre do escoamento, a decomposição de Reynolds vem expressa por:

$$\theta(x, y, z, t) = \langle \theta(x, y, z) \rangle + \theta'(x, y, z, t) \quad (2.2)$$

onde os parêntesis triangulares representam a média temporal, $(\langle \theta \rangle)$, e a plica representa oscilações temporais, (θ') .

Introduzindo a decomposição de Reynolds à equação (2.1) obtém-se as RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) [Pope, 2000], representada na equação (2.3):

$$\frac{\overline{D}\langle U_j \rangle}{\overline{D}t} = \nu \nabla^2 \langle U_j \rangle - \frac{\partial \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_j} \quad (2.3)$$

Aparentemente as equações (2.3) e (2.1) são as mesmas, exceto o aparecimento do termo não linear correspondente às tensões de Reynolds $(\langle u'_i u'_j \rangle)$, tendo este um papel crucial na equação para o campo da velocidade média $\langle U \rangle$.

As RANS têm sido usadas como ferramenta para modelação e interpretação de resultados numéricos e experimentais. No entanto, existem situações em que não podem ser aplicáveis. Ou seja, estas utilizam-se apenas em situações em que a fronteira é lisa ou irregular. Nos casos em que o escoamento apresenta uma estrutura tridimensional complexa, estas equações não representam de forma conveniente as zonas junto às fronteiras rugosas, não sendo assim indicada a sua utilização para o presente tema em estudo, escoamentos em leitos com vegetação.

2.3. ESCOAMENTOS COM VEGETAÇÃO

As planícies de inundação e as adjacentes zonas húmidas, no percurso de um rio, têm uma função vital a nível ecológico e paisagístico (Figura 2.2). A sua vegetação é uma mistura heterogénea de ervas, arbustos e árvores que influenciam o transporte de sedimentos, nutrientes e poluentes [Nepf e Vivoni, 2000]. Assim, a vegetação desempenha um papel fundamental no sistema inter-relacionado do escoamento, transporte de sedimentos e geomorfologia de um curso de água. [Tsujiyamoto, 1999].



Figura 2.2 – Zona húmida com uma densidade aleatória de vegetação.[2]

Na generalidade dos casos, a presença de vegetação num escoamento altera as condições hidrodinâmicas do mesmo [Kadlec, 1995], nomeadamente, tem impacto na resistência hidráulica [Yen 2002] e na turbulência [Nepf, 1999].

O aumento da resistência hidráulica exercido pelas plantas reduz o caudal médio entre as regiões com vegetação, relativamente às que não apresentam vegetação [Kadlec, 1990]. Esta deflexão promove a acumulação de sedimentos devido à redução das tensões no leito do escoamento e consequente diminuição da capacidade de erosão [Ward et al., 1984]. Um aumento na resistência hidráulica conduz também a um aumento da altura do escoamento, influenciando assim as atividades biológicas e períodos de cheia [Kadlec, 1990].

Afetando a velocidade média de escoamento, a vegetação influencia também a sua intensidade de turbulência. A conversão da energia cinética em energia cinética turbulenta, através das instabilidades criadas pelas hastes da vegetação, faz com que a turbulência do regime aumente [Nepf, 1999].

Considerando as condições de um escoamento em canais com vegetação, que apresentam uma estrutura tridimensional complexa, a resistência hidráulica não poderá ser descurada, sendo assim, a utilização das RANS é inadequada, como já anteriormente afirmado.

De forma a solucionar este problema, para além de recorrer às médias temporais, as equações de Navier-Stokes terão que ser complementadas com as médias espaciais [Nikora et al., 2007].

2.3.1. EQUAÇÕES *DOUBLE-AVERAGED NAVIER-STOKES*

A metodologia *Double-Average* (DAM) fornece equações de movimento e continuidade, que exprimem as variáveis hidráulicas médias tanto a um nível temporal como espacial, contendo termos adicionais importantes, permitindo a simulação e compreensão de escoamentos sobre fronteiras irregulares, surgindo neste processo as tensões dispersivas, a resistência de forma e a resistência viscosa (*form-induced stresses*, *form drag* e *viscous drag*, respetivamente, na literatura inglesa) [Nikora et al. 2007].

A aplicação da DAM às equações Navier-Stokes origina um conjunto de equações designadas por equações *Double-Averaged Navier-Stokes* (DANS). Desta forma, estas poderão ser entendidas como a aplicação do operador média espacial às RANS.

Assim, considerando θ o valor instantâneo de uma variável genérica, a sua decomposição, no contexto DAM [Pokrajac et al. 2008],

$$\theta = \langle \bar{\theta} \rangle + \tilde{\theta} + \theta' \quad (2.4)$$

Onde $\langle \bar{\theta} \rangle$ representa a média espacial e temporal de θ , $\tilde{\theta}$ representa a flutuação espacial dos valores da média temporal de θ e θ' representa a flutuação temporal.

O operador média espacial num dado volume para uma variável genérica média temporal, $\langle \bar{\theta} \rangle$, é definido por:

$$\langle \bar{\theta} \rangle = \frac{1}{V_f} \iiint_{V_o} \bar{\theta} \, dx \, dy \, dz \quad (2.5)$$

Em que $\langle \bar{\theta} \rangle$ representa a média espaço-temporal da variável θ , V_f é o volume do fluido ao nível da cota z contido no volume total V_o .

De forma a proceder à média espacial no escoamento dois teoremas deverão ser usados [Nikora, 2007]. O primeiro, conhecido como teorema geral do transporte serve como ferramenta para obter uma média espacial das derivadas temporais:

$$\left\langle \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \iint_{S_{int}} \bar{\theta} v \cdot n \, dS \quad (2.6)$$

O segundo teorema é identificado como teorema da média espacial:

$$\left\langle \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{V_f} \iint_{S_{int}} \bar{\theta} n_i \, dS \quad (2.7)$$

Nestes teoremas, $\bar{\theta}$ é uma variável do escoamento definida no volume do fluido, $\psi = \psi(z) = \frac{A_f(z)}{A_T}$ expressa a percentagem de vazios, ou seja, a relação entre a área ocupada pelo fluido A_f , e a área total A_T , num dado nível z , S_{int} é a superfície de interface entre a parte sólida e a parte líquida do volume de controlo, n_i é a componente i do vector unitário normal ao leito na direção da parte sólida para a parte líquida e v é a velocidade no leito do escoamento.

De forma a simplificar alguns termos que tem origem da dedução das DANS a partir das RANS, deve-se ter em consideração que a média da equação da continuidade escrita em termos de média temporal, $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$, resulta em:

$$\left\langle \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{V_f} \iint_{S_{int}} \bar{u}_i n_i dS = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = \frac{1}{V_f} \iint_{S_{int}} \bar{u}_i n_i dS \quad (2.8)$$

Caso a fronteira seja fixa e não porosa $\frac{1}{V_f} \iint_{S_{int}} \bar{u}_i n_i dS = 0$, assumindo-se então a equação da continuidade:

$$\frac{\partial \psi \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.9)$$

Deste modo, utilizando os enunciados teoremas e simplificações, obtemos as seguintes equações das médias temporais e espaciais para a conservação de momentos.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_i \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} &= g_j - \frac{1}{\psi \rho} \frac{\partial \psi \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \bar{u}'_j \bar{u}'_i \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \bar{u}_j \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{\psi} \frac{\partial y}{\partial x_i} \left(\psi \left\langle v \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right\rangle \right) \\ &+ \frac{1}{\rho V_f} \int_{S_{int}} \bar{p} n_j dS - \frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} v \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} n_i dS - \frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} \bar{u}_j \bar{u}_i n_i dS - \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{V_f} \int_{S_{int}} \bar{u}_i n_i dS \\ &+ \frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} \bar{u}_j \bar{u}_i n_i dS + \frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} \bar{u}'_j \bar{u}'_i n_i dS - \frac{\langle \bar{u}_i \rangle}{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Considerando que a fronteira sólido-fluido é fixa no tempo e não porosa, e que existe a condição de não escorregamento, as DANS simplificam-se para a seguinte forma (Finningan 2000, Nikora et al. 2007):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_i \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} &= g_j - \frac{1}{\psi \rho} \frac{\partial \psi \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \bar{u}'_j \bar{u}'_i \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \bar{u}_j \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{\psi} \frac{\partial y}{\partial x_i} \left(\psi \left\langle v \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right\rangle \right) \\ &+ \frac{1}{\rho V_f} \int_{S_{int}} \bar{p} n_j dS - \frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} v \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} n_i dS \end{aligned} \quad (2.11)$$

Em comparação com as RANS, nota-se que a variabilidade espacial origina três termos novos, $\frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \tilde{u}_j \tilde{u}_i \rangle}{\partial x_i}$ corresponde ao gradiente das tensões dispersivas, $\frac{1}{\rho V_f} \int_{S_{int}} \bar{p} n_j dS$ representa a resistência de forma (força por unidade de massa de líquido) e $\frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} \nu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} n_i dS$ reproduz a resistência viscosa (força por unidade de massa de líquido). Os restantes termos são provenientes das RANS, $\frac{\partial \langle \tilde{u}_j \rangle}{\partial t}$ como aceleração local do fluido, $\langle \tilde{u}_i \rangle \frac{\partial \langle \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_i}$ simboliza a aceleração convectiva do fluido, g_j significa a aceleração da gravidade, $\frac{1}{\psi \rho} \frac{\partial \psi \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_j}$ representa a pressão (por unidade de massa), $\frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \bar{u}_j \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i}$ simboliza o gradiente das tensões de Reynolds e $\frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \left(\psi \langle \nu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \rangle \right)$ significa o gradiente das tensões viscosas.

A utilização da metodologia *Double-Averaging*, apresenta como principais vantagens a ligação consistente entre as médias espaciais dos parâmetros de rugosidade, tensões de corte do leito e as variáveis médias do escoamento. Determina também, de uma forma explícita, a resistência viscosa, a resistência de forma e as tensões dispersivas devido às derivações rigorosas em vez de aproximações intuitivas. Permite um escalonamento de considerações e parametrizações baseado nas variáveis DAM, fornecendo melhores definições para os parâmetros hidráulicos como a uniformidade do escoamento, bidimensionalidade e tensões de corte existentes no leito. [Nikora et al, 2007]

Tendo em consideração as vantagens explicitadas no parágrafo anterior, a utilização das DANS é adequada para a análise e interpretação de dados, para o desenvolvimento de modelos numéricos, para guiar desenvolvimentos e parametrizações conceptuais e para integrar efeitos de pequena escala em cenários de grande escala [Nikora et al, 2007]. No entanto, a demonstração das DANS servirá como base para desenvolvimentos em futuros trabalhos, não estando diretamente aplicadas no presente estudo (Capítulo 5).

2.4. RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO

2.4.1. TEOREMA DA QUANTIDADE DO MOVIMENTO

De forma a determinar a resistência ao escoamento, R , existente num canal, foi considerado o Teorema da Quantidade de Movimento. Este permite obter características importantes do escoamento sem que seja necessário integrar as equações gerais do movimento dos fluidos, sendo conseguido um conhecimento geral a partir, unicamente, das condições fronteira conhecidas [J. Novais-Barbosa, 1985].

O Teorema da Quantidade de Movimento pode ser deduzido tanto, a partir dos princípios gerais da Mecânica aplicados a um volume de fluido, ou a partir das equações gerais da Hidrodinâmica [J. Novais-Barbosa, 1985].

À soma dos produtos da massa de cada partícula pela respetiva velocidade define-se como quantidade de movimento

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i \quad (2.12)$$

onde m_i e $\vec{v}_i$ representam, respectivamente, a massa e a velocidade da partícula de ordem i [J. Novais-Barbosa, 1985].

Para um meio contínuo, com massa total do sistema constante, o Teorema da Quantidade de Movimento exprime-se do seguinte modo:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \quad (2.13)$$

o que significa que, a derivada em relação ao tempo da quantidade de movimento de um sistema de partículas é igual ao somatório de todas as forças exteriores aplicadas aos sistema [J. Novais-Barbosa, 1985].

Seguindo a dedução das expressões gerais de mecânica de fluidos, apresentada no livro *Mecânica de Fluidos Hidráulica Geral Volume I* [J. Novais-Barbosa, 1985], a expressão mais geral do Teorema da Quantidade de Movimento aplicado à mecânica de fluidos é

$$\int_S \rho v_i v_j n_j dS = - \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) dv + \int_V \rho G_i dv + \int_S T_i dS \quad (2.14)$$

Sendo S uma superfície de controlo que limita um volume de controlo, V , e dv um elemento desse volume.

Conclui-se que a equação anterior exprime o Teorema da Quantidade de Movimento, já que o primeiro membro da Equação (2.14) representa a variação da quantidade de movimento na unidade de tempo e o segundo membro, a soma das forças aplicadas. $\int_S T_i dS$ corresponde à resultante das tensões exercidas, ao longo da superfície de controlo, $\int_V \rho G_i dv$ representa as forças de massa que actuam sobre o fluido contido no interior da superfície de controlo, e a primeira parcela do segundo membro representa o integral da variação local da densidade de fluxo de massa, que se anula quando o escoamento é permanente [J. Novais-Barbosa, 1985].

Tendo em conta o caso prático em que se insere o estudo, a superfície de controlo é constituída pela superfície do canal e de todas as hastes inseridas, entre duas secções transversais do canal, tal que em cada ponto sejam perpendiculares ao vetor da componente longitudinal da velocidade.

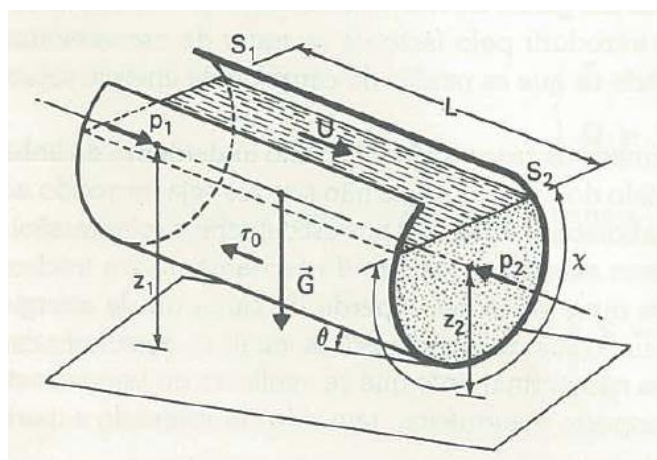


Figura 2.3 – Esquema da aplicação do teorema [J. Novais-Barbosa, 1986].

Considerando-se que se trata de um fluido incompressível em regime permanente num canal horizontal, o Teorema da Quantidade de Movimento aplicado ao fluido contido no interior da superfície de controlo pode-se exprimir por:

$$\int_S \rho \vec{v}(\vec{v}|\vec{n})dS = \int_S \vec{T}_i dS \quad (2.15)$$

O fluxo da quantidade de movimento só se verifica através das secções S_1 e S_2 , assim

$$\int_S \rho \vec{v}(\vec{v}|\vec{n})dS = \alpha' \rho (U_1^2 S_1 \vec{n}_1 + U_2^2 S_2 \vec{n}_2) \quad (2.16)$$

em que α' é o coeficiente de quantidade de movimento, U_1 e U_2 representam, respectivamente, as grandezas das velocidades médias nas secções S_1 e S_2 .

O último integral da Equação (2.15), $\int_S \vec{T}_i dS$ pode ser decomposto em três parcelas correspondentes às acções que o meio exerce na secção S_1 e S_2 , mais a acção que o fluido, contido na superfície de controlo, exerce sobre as paredes, leito e hastes do canal, $\vec{R}$, isto é, respectivamente,

$$\int_S \vec{T}_i dS = -p_1 S_1 \vec{n}_1 - p_2 S_2 \vec{n}_2 - \vec{R} \quad (2.17)$$

A expressão do Teorema da Quantidade de Movimento aplicada ao presente caso experimental será

$$\alpha' \rho (U_1^2 S_1 \vec{n}_1 + U_2^2 S_2 \vec{n}_2) = -p_1 S_1 \vec{n}_1 - p_2 S_2 \vec{n}_2 - \vec{R} \quad (2.18)$$

onde p_1 e p_2 representam as pressões médias nas secções S_1 e S_2 respectivamente.

3

CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Para a caracterização do escoamento turbulento em leitos com vegetação rígida é necessário determinar quantidades instantâneas, nomeadamente velocidades instantâneas, recorrendo à técnica não intrusiva do *Laser Doppler Anemometry* (LDA).

As medições foram realizadas no canal hidráulico do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



Figura 3.1 - Vista geral do canal hidráulico.

As instalações laboratoriais e instrumentação serão descritas nas seguintes secções.

3.2. INSTALAÇÃO LABORATORIAL

O circuito hidráulico é composto por um canal prismático com as respetivas estruturas de entrada e saída, suportado por uma estrutura metálica e por um circuito de recirculação.

O canal prismático de secção transversal retangular tem cerca de 17 m de comprimento, 40 cm de largura e 60 cm de altura. Lateralmente apresenta 4 painéis de vidro transparente apoiados numa estrutura metálica, numa extensão de 12 m, que permitem a visualização do escoamento e medições com técnicas baseadas na visualização do escoamento.

O sistema de inclinação variável é composto por um suporte em contacto com o chão e com a coluna metálica que suporta o canal. Este sistema permite o ajuste do declive do canal.

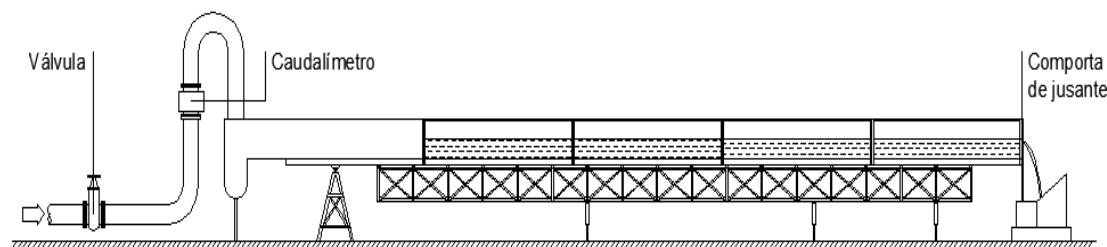


Figura 3.2 - Desenho esquemático de parte do circuito hidráulico do canal do laboratório.

A jusante, na estrutura de saída, a água é escoada verticalmente, para um tanque de armazenamento através de uma comporta basculante, que pode ser usada para regular a altura de um escoamento lento no canal (Figura 3.3 a).

As estruturas de entrada e saída do canal são ligadas pelo sistema de recirculação do canal, composto por um circuito em pressão, no qual se controla o escoamento.

Por intermédio de uma bomba centrífuga, a água armazenada num tanque a montante desta, é elevada por uma conduta de 500 mm de diâmetro para um reservatório com a capacidade de cerca de 42 m³. A bomba consegue elevar um caudal máximo de 20 l/s e a admissão é feita através de um tanque diferente daquele que recebe o escoamento, de forma a minimizar a entrada de ar. Ainda a jusante da bomba existe uma válvula de seccionamento e uma válvula de retenção.

A ligação entre a estrutura de entrada do canal e o reservatório é estabelecida através de uma conduta de ferro fundido de 250mm de diâmetro. A jusante do reservatório existe uma válvula que permite a regulação do caudal (Figura 3.3 b). Através de um caudalímetro digital, é possível medir o caudal instantâneo (Figura 3.3 c).

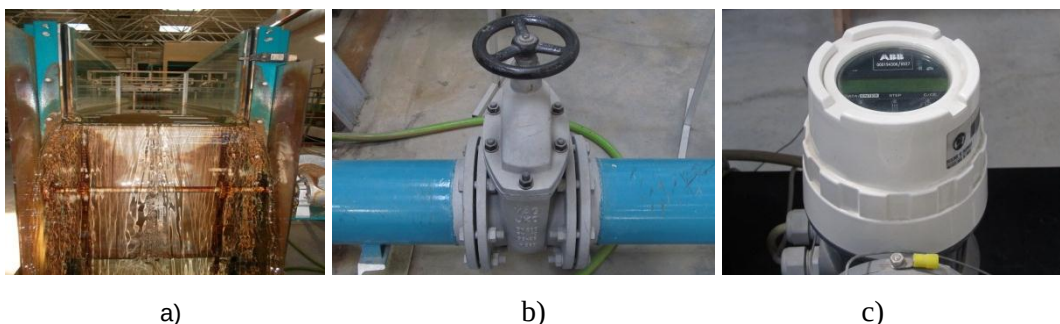


Figura 3.3 - Componentes da instalação laboratorial: a) comporta basculante; b) válvula de regulação do caudal; c) caudalímetro digital.

3.3. INSTRUMENTAÇÃO

A utilização de equipamento nas instalações laboratoriais centrou-se à tarefa de medição de campos de velocidades instantâneas com recurso a um sistema laser. Para tal, realizaram-se ensaios experimentais, fazendo uso de uma técnica correntemente utilizada designada por LDA (*Laser Doppler Anemometry*). Esta técnica é frequentemente utilizada para estudos dinâmicos de gases e líquidos e permite obter informações sobre a velocidade dos escoamentos. Tem como vantagens principais o facto de ser uma técnica de medição não intrusiva, com alta resolução espacial e temporal, sem necessidade de calibração e com capacidade para medir escoamentos com recirculação.

O princípio de funcionamento baseia-se essencialmente no efeito de Doppler. Ao atravessarem o volume de controlo, as partículas suspensas no escoamento refletem luz que é recolhida pelo foto-detector. A luz recolhida tem uma frequência própria, designada de frequência de Doppler, que é diferente da frequência da luz emitida pelo laser. O volume de controlo resulta da intersecção dos dois feixes emitidos e possui poucos milímetros de comprimento. A intensidade de luz é modulada devido à interferência entre os feixes do laser que produz planos paralelos de alta intensidade de luz designados por franjas. A informação da velocidade provém da luz dispersa por partículas muito pequenas existentes no escoamento, à medida que estas se vão deslocando através do volume de controlo. A frequência da luz refletida é proporcional à componente da velocidade perpendicular à linha formada pelos feixes emitidos. A luz refletida é captada pelas lentes recetoras e focada no foto-detector. Antes da chegada ao foto-detector, existe um filtro de interferência que permite apenas a passagem dos comprimentos de onda pretendidos eliminando assim ruídos provenientes da luz ambiente e de outros comprimentos de onda.

Uma definição mais pormenorizada da técnica LDA poderá ser encontrada no ponto seguinte do presente capítulo (ponto 3.4).

O sistema laser de medição LDA disponível no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto é constituído pelos seguintes elementos:

- Cabeça do laser - Modelo 177 G da *Dantec Dynamics*® (figura 4);
- Fonte de alimentação do laser;
- Controlador opcional - Modelo 385F;
- Sonda laser (Figura 3.4);
- Foto-detector (Figura 3.4);
- Processador de dados;



Figura 3.4 - Sonda do laser (à esquerda), foto-detetor (em cima à direita) e cabeça do laser (em baixo à direita).

3.4. O SISTEMA LASER DOPPLER ANEMOMETRY (LDA)

A técnica do Laser Doppler Anemometria (LDA), como o nome indica, é uma técnica que utiliza um laser e o efeito doppler para medições de velocidade.

É um processo ótico, por isso, estreitamente relacionado com uma componente física e geométrica. De forma a descrever a funcionalidade do LDA, serão expostas algumas propriedades físicas de um feixe luminoso e da sua propagação [Zhang, 2010].

3.4.1. ONDA DE LUZ E SUA PROPAGAÇÃO

O feixe de luz é uma onda eletromagnética que é especificada pelo seu comprimento de onda, λ , pela amplitude e pela sua polarização, embora esta ultima propriedade não seja considerada para situações em que o ângulo de refração é reduzido [Zhang, 2010]. Ignorando então a contribuição da polarização, a propagação no espaço de uma onda de luz com amplitude E_0 no sentido positivo da direção x pode ser expressa por:

$$E = E_0 \cos(\omega t - \kappa x) \quad (3.1)$$

Os parâmetros $\omega = 2\pi/T$ e $\kappa = 2\pi/\lambda$ representam, respectivamente, a frequência angular e número de onda do feixe luminoso, onde T é o período de oscilação e λ significa o comprimento de onda. Estes estão ligados à velocidade de propagação das ondas i.e. a velocidade da luz no meio de propagação. A velocidade da luz é então obtida através de:

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\kappa} = \nu\lambda \quad (3.2)$$

onde $\nu = 1/T$ representa a frequência de oscilação da onda de luz. Em vácuo, a velocidade da luz é considerada como sendo igual a $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s [Zhang, 2010]. No entanto, num meio como a água, a velocidade de propagação será menor à considerada no vácuo. O rácio entre as diferentes velocidades verificadas é indicado por n e denominado por índice de refração. Para o caso em que o feixe luminoso passa de um meio (n_1) para outro (n_2), a velocidade da luz muda de c_1 para c_2 , respeitando a seguinte relação:

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (3.3)$$

O terceiro termo é obtido através do princípio que a frequência do feixe de luz não se altera quando a luz é refratada na interface dos dois meios, respeitando $c = \nu\lambda$, significando assim que o comprimento de onda é proporcional ao índice de refração do meio [Zhang, 2010].

A transmissão do feixe de um meio para outro está também relacionada com a mudança de direção de propagação do mesmo [Zhang, 2010]. Este fenómeno pode ser explicado pela lei de refração de acordo com a Figura 3.5:

$$n_1 \sin \varepsilon_1 = n_2 \sin \varepsilon_2 \quad (3.4)$$

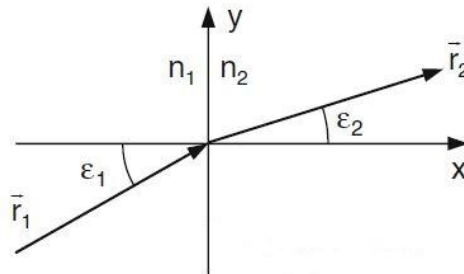


Figura 3.5 - Transmissão de um feixe luminoso de um meio para outro [Zhang, 2010].

Em que, ε_1 e ε_2 representam os ângulos de incidência e refração, respetivamente, correspondendo ao meio incidência e de refração [Zhang, 2010].

3.4.2. EFEITO DOPPLER

O Efeito Doppler nas situações óticas está associado á propagação da luz e à mudança de frequência quando o feixe de luz é refletido numa superfície em movimento. Tendo em conta que o feixe de luz emitido é independente do movimento da sua fonte, a fórmula matemática usada para descrever o efeito Doppler é a mesma para situações em que a fonte ou o recetor se encontram em movimento [Zhang, 2010].

Aplicando aos princípios do LDA, o feixe luminoso tem uma origem fixa, interage com um objeto em movimento e é observado por um recetor fixo. A partícula move-se com uma velocidade fixa igual a $\vec{u}_p$ [Zhang, 2010]. A frequência inicial do laser é de ν_0 , sendo ν_1 a frequência observada pela partícula em movimento, que pode ser obtida através de:

$$\nu_1 = \nu_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}}{c} \right) \quad (3.5)$$

A partícula no seu movimento dispersa a luz incidente na mesma frequência, ν_1 , numa direcção, $\vec{l}_2$. O feixe luminoso é depois recebido pelo recetor fixo com uma frequência diferente, ν_2 , devido ao efeito Doppler [Zhang, 2010].

$$\nu_2 = \nu_1 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (3.6)$$

No entanto, a frequência recebida, ν_2 , é demasiadamente elevada para ser medida pelos dispositivos convencionais. De forma a se poder usar o efeito Doppler no cálculo de velocidades em escoamentos, foi adotada uma configuração com dois feixes luminosos, que se mostra extremamente eficiente [Zhang, 2010].

3.4.3. SOBREPOSIÇÃO DE DUAS ONDAS DE LUZ

A configuração de duplo feixe luminoso do LDA assenta na proposição de que duas ondas eletromagnéticas são dispersas de forma diferente, tendo em conta o efeito Doppler. A sobreposição de dois feixes com diferentes frequências conduz à chamada “interferência ótica” [Zhang, 2010].

De acordo com a Figura 3.6, duas ondas com diferente amplitude e frequências definem-se por:

$$E_a = E_{a0} \cos(\omega_a t - k_a x) \quad (3.7)$$

$$E_b = E_{b0} \cos(\omega_b t - k_b x) \quad (3.8)$$

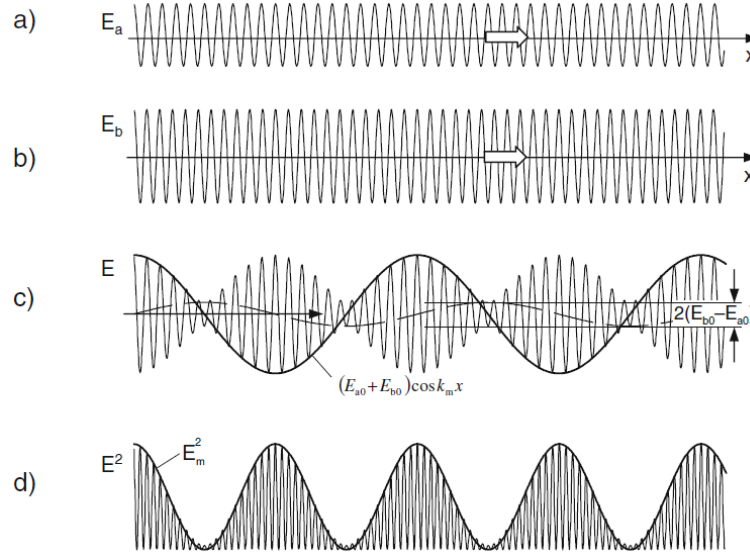


Figura 3.6 - Sobreposição de duas ondas luminosas [Zhang, 2010].

Foi assumida uma amplitude diferente para os dois raios laser devido ao facto de nas medições LDA a intensidade dos dois lasers dispersos pela partícula serem sempre diferentes. Isto verifica-se mesmo quando os dois feixes luminosos têm a mesma intensidade inicialmente [Zhang, 2010].

A sobreposição dos dois raios é dada por:

$$E = E_{a0} \cos(\omega_a t - k_a x) + E_{b0} \cos(\omega_b t - k_b x) \quad (3.9)$$

A onda sobreposta possui uma elevada frequência e uma reduzida frequência de modulação. De forma a calcular as duas frequências a equação (3.9) é reorganizada da seguinte forma:

$$E = E_{a0} [\cos(\omega_a t - k_a x) + \cos(\omega_b t - k_b x)] + (E_{b0} - E_{a0}) \cos(\omega_b t - k_b x) \quad (3.10)$$

Aplicando a relação trigonométrica:

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta) \quad (3.11)$$

ao primeiro termo do lado direito da equação (3.10), obtém-se a seguinte equação:

$$E = 2E_{a0} \cos\left(\frac{\omega_a + \omega_b}{2} t - \frac{k_a + k_b}{2} x\right) \cos\left(\frac{\omega_a - \omega_b}{2} t - \frac{k_a - k_b}{2} x\right) + (E_{b0} - E_{a0}) \cos(\omega_b t - k_b x) \quad (3.12)$$

Para próximos cálculos serão consideradas as seguintes simplificações:

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_a + \omega_b), \omega_m = \frac{1}{2}(\omega_a - \omega_b) \quad (3.13)$$

e

$$\bar{k} = \frac{1}{2}(k_a + k_b), k_m = \frac{1}{2}(k_a - k_b) \quad (3.14)$$

onde ω_m e k_m representam a frequência de modulação e numero de onda, respectivamente. Desta forma, a equação (3.12) é convertida em:

$$E = (E_{a0} + E_{b0}) \cos(\bar{\omega}t - \bar{k}x) \cos(\omega_m t - k_m x) + (E_{b0} - E_{a0}) \sin(\bar{\omega}t - \bar{k}x) \sin(\omega_m t - k_m x) \quad (3.15)$$

O formato principal da onda sobreposta compreende a alta frequência angular igual a $\bar{\omega}$ (i.e. $\bar{k}$ na distribuição espacial da onda) e a baixa frequência de modulação igual a ω_m (k_m) [Zhang, 2010]. A amplitude da elevada frequência de oscilação é dada pela onda modulada:

$$E_m = (E_{a0} + E_{b0}) \cos(\omega_m t - k_m x) \quad (3.16)$$

A intensidade da onda luminosa que é captada pelo olho humano e pelo fotodetector é dada pela intensidade de fluxo que é proporcional ao quadrado da amplitude de onda. Através da sobreposição de duas ondas como é dado na equação (3.15) e ilustrado na Figura 3.6c), a amplitude da principal oscilação da onda é a mesma dada pela onda modulada e dada pela equação (3.16) [Zhang, 2010]. Por causa disto, o tempo e a distribuição espacial de intensidades da onda sobreposta pode ser representada por:

$$E_m^2 = (E_{a0} + E_{b0})^2 \cos^2(\omega_m t - k_m x) \quad (3.17)$$

Ou, de forma equivalente:

$$E_m^2 = \frac{1}{2}(E_{a0} + E_{b0})^2 (1 + \cos 2(\omega_m t - k_m x)) \quad (3.18)$$

A densidade de fluxo, que é proporcional a E_m^2 , oscila com uma frequência angular de $2\omega_m = \omega_a - \omega_b$ que é conhecida como “frequência de batimento”. A distribuição espacial corresponde à referida oscilação e é demonstrada na figura 3.6 d) [Zhang, 2010].

3.4.4. PRINCÍPIO DO LDA

Depois de o efeito Doppler e a sobreposição de duas ondas eletromagnéticas terem sido discutidos anteriormente, será demonstrado o funcionamento do sistema LDA e sua funcionalidade. O sistema LDA é constituído por dois raios laser (A e B), que para simplificar a explicação serão considerados como tendo a mesma frequência (ν_0). Estes intersectam-se com um ângulo de 2α . A área de cruzamento dos dois lasers é denominada como “volume de medição”. Assume-se que uma partícula que esteja naturalmente suspensa no escoamento atravessa o volume de medição, dispersando os dois feixes luminosos simultaneamente. Devido ao diferente *layout* dos dois raios lasers, a partícula em movimento, com velocidade $\vec{u}_p$, receberá diferentes frequências de onda devido ao efeito de Doppler. Um detector está localizado na direcção da luz que é dispersa do volume de medição [Zhang, 2010].

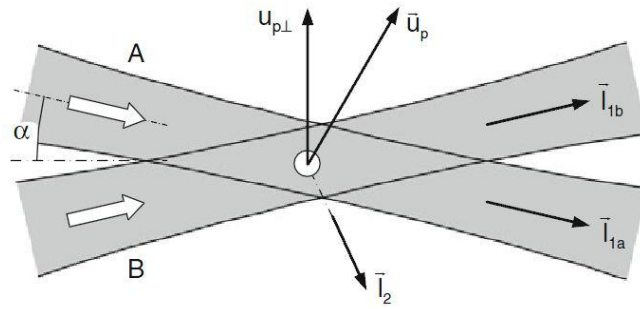


Figura 3.7 - Movimento da partícula através do volume de medição [Zhang, 2010].

As frequências das ondas dos feixes luminosos são recebidas pelo detector na direcção $\vec{l}_2$ são dadas por:

$$\nu_{2a} \approx \nu_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_{1a}}{c} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (3.19)$$

e

$$\nu_{2b} \approx \nu_0 \left(1 - \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_{1b}}{c} + \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{l}_2}{c} \right) \quad (3.20)$$

Quando recebidos pelo fotodetector, as ondas dos dois feixes luminosos, de frequências ν_{2a} e ν_{2b} , são sobrepostas [Zhang, 2010]. De acordo com o que já foi referido anteriormente (equação (3.18)), a densidade fluxo da onda resultante exibe uma frequência baixa, que pode ser facilmente medida através de aparelhos de medição convencionais [Zhang, 2010]. Esta baixa frequência é chamada de frequência de Doppler e é calculada através da Equação (3.19) e (3.20):

$$\nu_D = |\nu_{2a} - \nu_{2b}| = \frac{\nu_0}{c} |\vec{u}_p \cdot (\vec{l}_{1b} - \vec{l}_{1a})| \quad (3.21)$$

Devido a $c/v_0 = \lambda_0$ e $|\vec{u}_p \cdot (\vec{l}_{1b} - \vec{l}_{1a})| = 2u_{p\perp} \sin\alpha$, com $u_{p\perp}$ sendo a componente da velocidade da partícula perpendicular à bissetriz dos dois feixes luminosos, (3.21) transforma-se em:

$$v_D = 2 \frac{u_{p\perp}}{\lambda_0} \sin\alpha \quad (3.22)$$

Assumindo que a velocidade da partícula é igual à velocidade do escoamento, a velocidade do escoamento poderá ser obtida através de frequência de Doppler medida (Equação (3.22)) [Zhang, 2010].

$$u_{p\perp} = \frac{\lambda_0}{2\sin\alpha} v_D \quad (3.23)$$

O termo que é multiplicado à frequência de Doppler é uma constante física e geométrica. Este facto significa que o sistema LDA é um sistema sem necessidade calibração para medição de escoamentos [Zhang, 2010].

Tendo em conta que a frequência de Doppler é sempre positiva, independente da direcção da partícula, a componente da velocidade calculada na Equação (3.23), $u_{p\perp}$, corresponde apenas a um valor absoluto, não considerando a sua direcção. Um método para remover a ambiguidade da direcção de escoamento será explicitado mais à frente (Ponto 3.4.6) [Zhang, 2010].

3.4.5. INTERFERÊNCIAS DOS RAIOS LASER NO VOLUME DE MEDIÇÃO

A frequência de Doppler, da luz dispersa pela partícula, enquanto passa pelo volume de medição pode ser calculada tendo em conta a interferência dos raios laser no volume de medição [Zhang, 2010].

Dois raios de igual amplitude e frequência, a propagarem-se nas direcções $\vec{k}_a$ e $\vec{k}_b$, interseitam-se com um ângulo 2α [Zhang, 2010].

Devido à igual frequência angular, logo, iguais comprimentos de onda, iguais números de onda são dados como:

$$k = |\vec{k}_a| = |\vec{k}_b| = 2\pi/\lambda_0 \quad (3.24)$$

Na direcção perpendicular ao eixo da ótica, i.e., paralelo ao eixo x , a intensidade da luz altera com a distância igual a:

$$\Delta_x = \frac{\lambda_0}{2\sin\alpha} \quad (3.25)$$

Esta distância é conhecida como o espaçamento fronteira do volume de medição [Zhang, 2010].

A velocidade da partícula, que passa pelo volume de medição, pode ser então dada por:

$$u_{\perp} = \Delta_x \cdot v_D \quad (3.26)$$

Esta equação significa que a frequência Doppler pode ser considerada a alternância da frequência na intensidade da luz, que é dispersa pela partícula, ao passar pelo volume de medição [Zhang, 2010].

O correspondente sinal de luz está também representado na Figura 3.7.

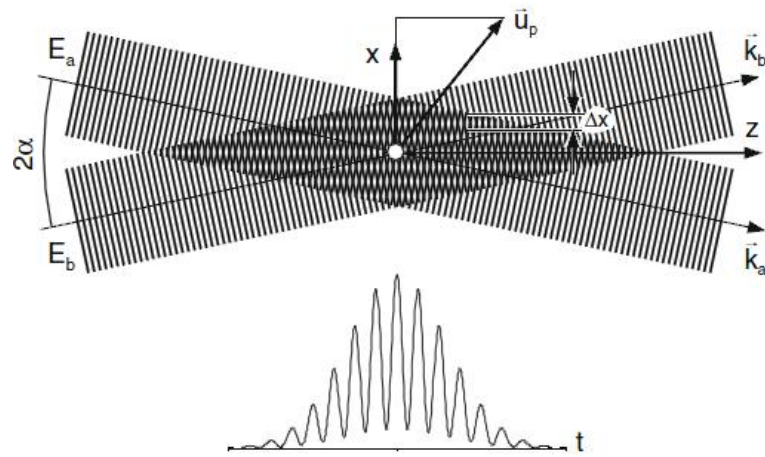


Figura 3.8 - Interferência dos raios laser no volume de medição (em cima) e o sinal “Doppler Burst” [Zhang, 2010].

Na terminologia LDA, ao sinal referido chama-se “Doppler Burst”. Devido aos raios laser usados no sistema LDA terem uma distribuição Gaussiana de intensidade, o “Doppler Burst” mostra a sua máxima amplitude quando a partícula se encontra no centro do volume de medição [Zhang, 2010].

3.4.6. MÉTODO DA ALTERAÇÃO DA FREQUÊNCIA

O método do LDA é baseado na avaliação dos sinais “Burst”, que são gerados pelas partículas a passar pelo volume de medição. No entanto existe uma ambiguidade na direção do fluido porque uma velocidade negativa ou positiva, com a mesma amplitude, criam a mesma frequência de Doppler. Os “sinais de explosão” envolvem assim apenas a magnitude mas não o sinal das respetivas velocidades. De forma a resolver a direção do escoamento de cada “Doppler Burst” a frequência é alterada num laser ou nos dois [Zhang, 2010].

O propósito de alterar a frequência da luz, é criar fronteiras que se deslocam no volume de medição numa direção pré-definida [Zhang, 2010].

Considerando que a frequência do raio laser A é aumentada em v_{sh} , assim $v_{a0} = v_0 + v_{sh}$. Desta forma os dois lasers apresentam frequências diferentes. Deste modo, as frequências recebidas pelo detector na direcção $\vec{l}_2$ podem ser obtidas a partir das seguintes equações:

$$v_{2a} = (v_0 + v_{sh})\left(1 - \frac{\vec{u} \cdot \vec{l}_{1a}}{c} + \frac{\vec{u} \cdot \vec{l}_2}{c}\right) \quad (3.27)$$

$$v_{2b} = v_0\left(1 - \frac{\vec{u} \cdot \vec{l}_{1b}}{c} + \frac{\vec{u} \cdot \vec{l}_2}{c}\right) \quad (3.28)$$

Tanto $\vec{l}_1$ e $\vec{l}_2$ são vectores unitários.

Na aplicação prática, a alteração da frequência v_{sh} é seleccionada na ordem dos Megahertz. Comparando com a frequência do feixe luminoso, é uma alteração muito reduzida, contudo, suficiente quando confrontado com a frequência de Doppler causada pela máxima velocidade do escoamento [Zhang, 2010].

Assim, o valor da alteração da frequência deverá assegurar que a diferença $(v_{2a} - v_{2b})$ seja constantemente positiva [Zhang, 2010]. Respeitando a condição apresentada, a frequência efetiva dos sinais luminosos medidos pelo fotomultiplicador será:

$$v_M = v_{2a} - v_{2b} = v_{sh} + \frac{v_0}{c} \vec{u} \cdot (\vec{l}_{1b} - \vec{l}_{1a}) + \frac{v_{sh}}{c} \vec{u} \cdot (\vec{l}_2 - \vec{l}_{1a}) \quad (3.29)$$

No entanto, o terceiro termo da equação do lado direito é desprezível visto que $v_{sh} \ll v_0$ [Zhang, 2010].

Considerando u_x como a componente da velocidade com sinal positivo de acordo com a Figura 3.7, a diferença dos vetores $(\vec{l}_{1b} - \vec{l}_{1a})$ coincide com o eixo positivo do x . Porque $\vec{u} \cdot (\vec{l}_{1b} - \vec{l}_{1a}) = 2 \cdot u_x \cdot \sin\alpha$, então a Equação (3.29) é simplificada para:

$$v_M = v_{sh} + 2v_0 \frac{u_x}{c} \sin\alpha \quad (3.30)$$

O terceiro termo da equação representa a frequência de Doppler causada pela velocidade do escoamento [Zhang, 2010]. Tendo em conta que $c = \lambda_0 v_0$ e utilizando a Equação (3.25), a ultima equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$v_M = v_{sh} + v_D = v_{sh} + \frac{u_x}{\Delta x} \quad (3.31)$$

A velocidade pode ser obtida então através de:

$$u_x = \Delta_x(v_M - v_{sh}) \quad (3.32)$$

Assim, através de uma comparação direta entre a frequência v_M , que é detectada pelo fotomultiplicador, e a frequência de alteração, v_{sh} , consegue-se obter tanto o valor como o sinal da velocidade da componente u_x [Zhang, 2010].

3.4.7. TAMANHO DO VOLUME DE MEDIÇÃO

No sistema LDA, o volume de medição é o princípio fundamental. O volume de medição, como outras performances óticas, determina a qualidade das medições ao escoamento. O volume de medição é criado pela intersecção de dois raios laser. Este cruzamento faz, por um lado, com que a intensidade da luz no volume de medição seja elevada, o que é necessário para detetar pequenas partículas que o atravessem. Por outro lado, ao criar uma secção constante de medida, assegura-se que a fiabilidade e a precisão das medições tenham um nível elevado [Zhang, 2010].

A forma do volume de medição pode ser aproximada à forma de uma elipse, como demonstrado na Figura. (3.9). O diâmetro da secção é dado pela espessura do raio laser

$$d_{mv} = \frac{2\omega_0}{\cos\alpha} \quad (3.33)$$

com α a representar metade do ângulo de intersecção entre os dois lasers.

A espessura da zona de medição é diretamente proporcional à espessura dos raios laser, dependendo também do arranjo ótico a ser utilizado, ou seja, foco das lentes utilizadas [Zhang, 2010].

O comprimento do volume de medição depende também da espessura do laser e do ângulo de cruzamento dos dois raios, podendo ser obtido por:

$$2\alpha = \frac{d_{mv}}{\tan\alpha} = \frac{2\omega_0}{\sin\alpha} \quad (3.34)$$

Em comparação com a espessura da secção, o volume de medição tem um comprimento muito maior, dependendo, mais uma vez, do arranjo ótico [Zhang, 2010]. A sua dimensão revela-se extremamente importante para escoamentos turbulentos em que a aleatoriedade de direções das partículas tem uma papel muito importante para os valores de velocidade instantâneos obtidos.

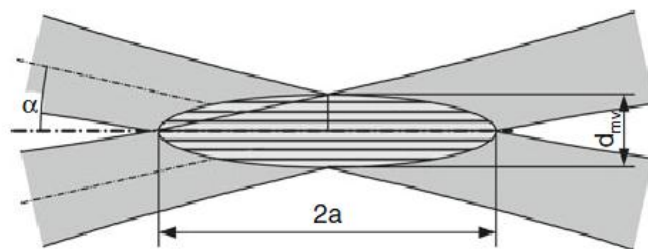


Figura 3.9 - Especificação do tamanho do Volume de Medição [Zhang, 2010].

3.5. VELOCIDADES INSTANTÂNEAS/MÉDIAS

De forma a obter o valor da velocidade média do ponto de medição, definiu-se no programa BSA Flow Software, como termo de paragem do ensaio, uma de duas condições:

- A obtenção de 200 000 amostras;
- Terem decorrido 300 segundos de aquisições.

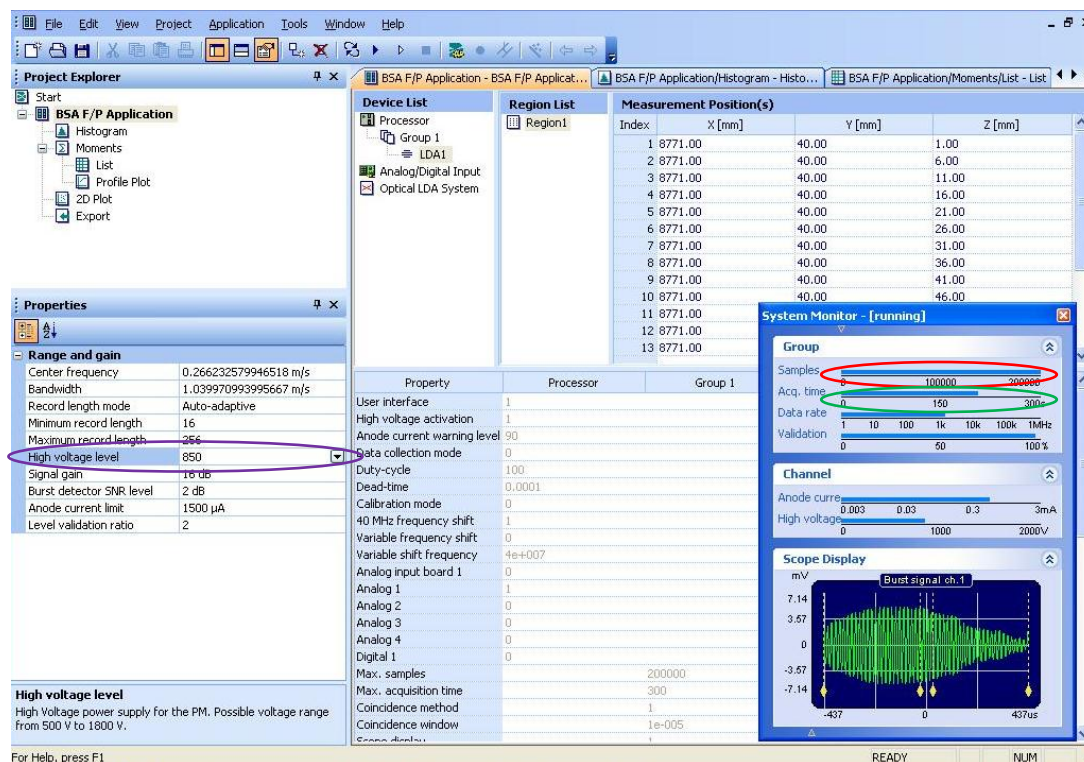


Figura 3.10 – Janela do software BSA Flow Software.

Os referidos termos de paragem estão representados na Figura 3.10, onde a elipse vermelha representa o parâmetro a) e a verde o parâmetro b). Está também assinalado através da elipse violeta o espaço onde se procede ao controlo da diferença de potencial do laser, que é definida consoante a posição em que se realiza a medição de forma a obter o melhor sinal possível.

Após a recolha dos valores da velocidade instantânea, o *software* realiza a média das amostras conseguidas. Os valores das velocidades médias temporais e os restantes dados fornecidos pelo programa, representados na Figura 3.11 (elipse vermelha), são posteriormente organizados em ficheiros do programa Microsoft Office Excel.

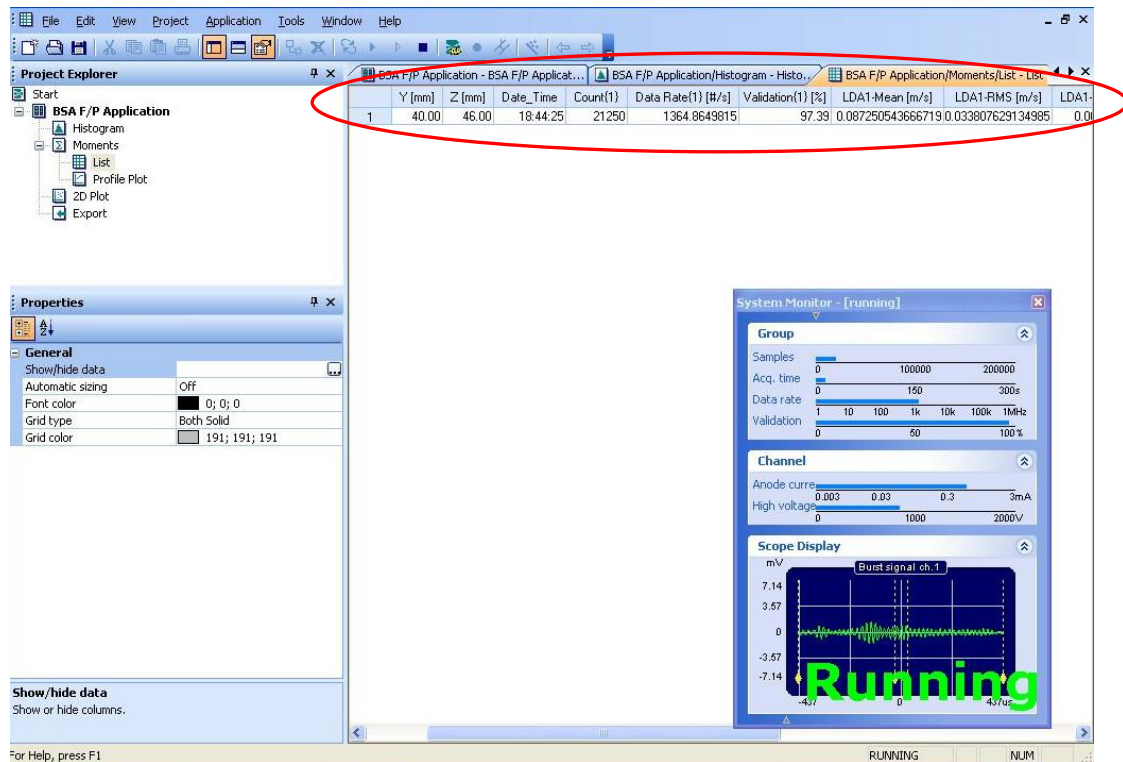


Figura 3.11 – Janela do software BSA Flow Software referente aos dados exportados.

Todos os valores de velocidade medidos pelo dispositivo em cada ponto de medição são armazenados em ficheiros de texto, de forma a permitir uma futura análise. O formato de armazenamento dos dados nos ficheiros apresenta-se na figura seguinte.

```

Region1
"Row#" "AT [ms]" "TT [us]" "LDA1 [m/s]"
1 0.010240000000000 109.2266684282 0.106851333978398
2 0.447146666666667 723.6266392283 0.119030564230756
3 0.993280000000000 136.5333300782 0.122263808037292
4 2.713600000000001 191.1466679303 0.166755673574094
5 5.143893333333334 54.6133342141 0.085309582899718
6 7.055360000000000 95.5733339651 0.109251483024661
7 7.164586666666667 68.2666650391 0.099591409165444
8 7.273813333333334 81.9199995021 0.073626254147195
9 7.437653333333333 68.2666650391 0.094295226905933
10 7.574186666666667 109.2266684282 0.080390286126739
11 7.710720000000000 136.5333300782 0.090585919046183
12 11.069440000000002 1256.1066541821 0.080925853853391
13 13.581653333333334 95.5733339651 0.077256212220459
14 13.991253333333333 81.9199995021 0.063569466021250
15 14.592000000000001 81.9199995021 0.078882761513463
16 14.783146666666667 150.1866645413 0.079140622320266
17 14.946986666666668 150.1866645413 0.121212510030609
18 15.247360000000002 136.5333300782 0.102626295838617
19 15.356586666666669 81.9199995021 0.083206978219926
20 15.820800000000000 68.2666650391 0.086440222026463
21 16.066559999999999 95.5733339651 0.087213821779722
22 17.049600000000002 464.2133426387 0.108299354918234
23 20.244480000000003 95.5733339651 0.036850544363151
24 20.517546666666668 136.5333300782 0.007136407133561
25 20.954453333333333 122.8799956152 0.022846418517456
26 21.418666666666670 54.6133342141 0.069936779400854
27 21.637120000000003 68.2666650391 0.056468223448418
28 21.964800000000000 81.9199995021 0.096338327912286
29 22.128640000000001 136.5333300782 0.036156287896558
30 22.347093333333333 68.2666650391 0.068151552200941
31 22.838613333333335 136.5333300782 0.074598211033818

```

Figura 3.12 – Representação do formato de armazenamento dos valores de velocidade medidos, nos ficheiros txt.

3.6. CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS PRELIMINARES

Para perceber a forma como o escoamento é afetado pelo fundo rugoso, e para calibrar os perfis transversais e verticais, detetando assim possíveis incorreções na construção do modelo, procedeu-se à realização de ensaios preliminares (sem influência da vegetação no canal) em 4 zonas ao longo do canal.

Os ensaios preliminares do estudo em leitos com vegetação emersa e rígida basearam-se na determinação dos perfis instantâneos de velocidades de um escoamento em regime uniforme com os seguintes parâmetros:

- a) N° de Froude = 0.3
- b) $b/h = 5$

Através da imposição b), foi obtida a altura de escoamento, h , considerando b , largura do canal, igual a 0,4m:

$$\frac{b}{h} = 5 \Leftrightarrow h = \frac{0.4}{5} = 0.08m$$

De seguida, a partir da imposição a), calcula-se a velocidade média de escoamento pela expressão do número de Froude (Equação (4.1)). Por último, de forma a se conseguir o valor do caudal a utilizar, foi utilizada a Equação da Continuidade (Equação (4.2)):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (4.1)$$

$$Q = U \cdot S \quad (4.2)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h}} = 0.3 \Leftrightarrow U = 0.3 \times \sqrt{9.81 \times 0.08} = 0.266 \text{ m/s}$$

$$Q = U \cdot S \Leftrightarrow Q = 0.266 \times 0.08 \times 0.4 = 8.5 \text{ l/s}$$

em que g é a aceleração da gravidade, U é a velocidade do escoamento e S é a secção do escoamento. Para estas condições hidráulicas realizaram-se os ensaios que serão apresentados na presente secção 4.1.

3.6.1. FUNDO DO CANAL

Tendo em consideração o objetivo deste trabalho, o estudo do escoamento em canais com vegetação emersa rígida, procurou-se representar o mais semelhante possível as condições de um escoamento natural de um rio ou de uma ribeira com caules de vegetação distribuídos segundo um padrão

repetitivo e uniforme composto por zonas de maior abundância e zonas de maior escassez de vegetação, como é possível verificar na Figura 4.13.

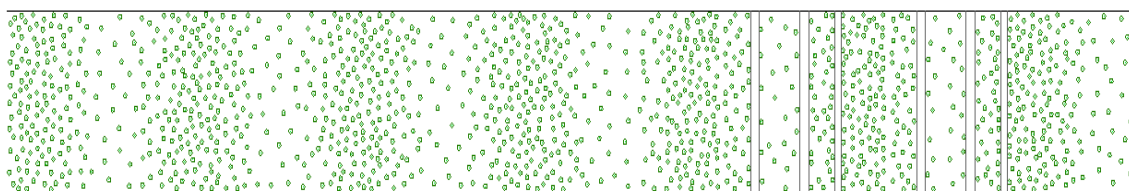


Figura 3.13 - Representação das sete placas de acrílico, furadas (pontos verdes), que constituem o fundo do canal.

Uma vez limpo o fundo do canal, montaram-se sete placas retangulares de acrílico, furadas por máquinas de furação de controlo numérico computadorizado, com comprimentos variados, perfazendo um total de 3.5m (Figura 3.13). Estas placas cobrem todo o fundo do canal, têm uma espessura de 2 cm e os furos atingem 1 cm de profundidade (Figura 3.15a)). Estes furos servirão para a futura cravação manual das hastes metálicas na vertical, que simulam os caules rígidos de uma zona povoada por vegetação.

No que diz respeito às características do leito, é reproduzido um leito rugoso com a utilização de um material granular formado por cascalho fino com dimensões médias de 4 a 12 mm (Figura 3.14). A superfície horizontal fica então coberta por uma camada desse agregado com cerca de 2.5 cm de espessura.



Figura 3.14 - Material usado para a construção do leito rugoso.

O material foi espalhado e calcado manualmente de forma a obter um leito tão paralelo ao fundo do canal quanto possível e sem qualquer tendência de inclinação. Adicionaram-se também pequenas quantidades de areia atenuando a rugosidade do leito e preenchendo os vazios existentes entre o cascalho fino, de forma a um leito natural. Na Figura 3.15 a) é possível observar um esquema da constituição do leito rugoso. Com o intuito de fixar a altura de escoamento a jusante das placas de acrílico furadas, colocou-se uma soleira espessa permeável nessa secção, formada por material de dimensão média de 25 mm. Foi necessário proceder ao ajuste do perfil transversal da soleira por tentativas, tendo em vista o controlo da altura de escoamento e a horizontalidade do topo da soleira segundo a transversal ao canal. É possível observar o perfil da soleira na Figura 3.15 b) e Figura 3.15 c).

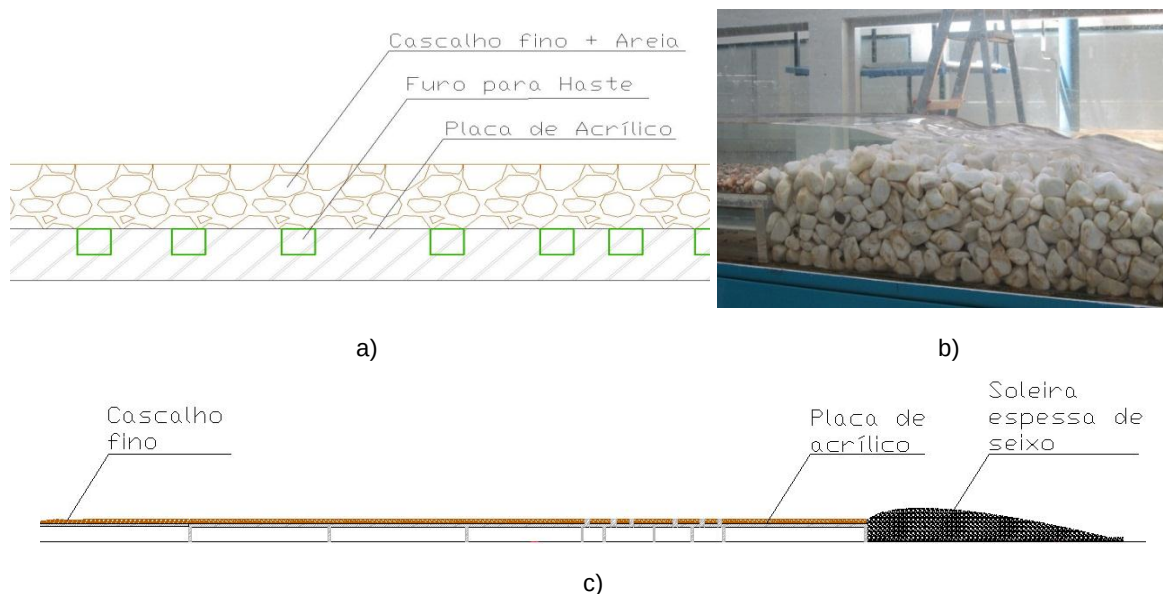


Figura 3.15 - a) Esquema do fundo do canal sem as hastes; b) Fotografia da soleira a jusante; c) Esquema do canal sem vegetação e do perfil da soleira de seixo.

3.6.2. POSIÇÕES DAS MEDIÇÕES NO CANAL

As medições das velocidades foram especificamente posicionadas segundo as três direções espaciais do sistema referencial x , y e z . A direcção x surge associada à direcção longitudinal do canal, a direcção y à direcção transversal, segundo a normal às paredes laterais do canal, e a direcção z segundo a vertical, direcção normal ao plano do fundo do canal (Figura 3.16).

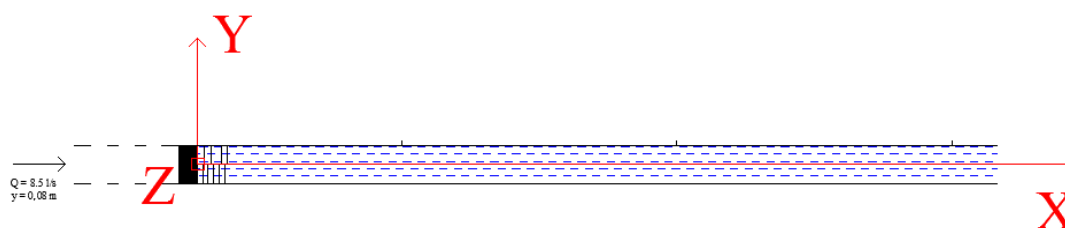


Figura 3.16 - Sistema do referencial de coordenadas x y z .

O sistema referencial tem o seu ponto de origem (0,0,0) no início do canal, segundo a direcção longitudinal (direcção x), a meio do canal segundo a direcção transversal (direcção y) e na base da placa de fundo segundo a direcção vertical (direcção z).

Na definição do início do canal segundo a direcção x , procurou-se o ponto a partir do qual as características do escoamento seriam o mais próximo possível das características de um regime uniforme turbulento instalado. Assim, considerou-se a abcissa $x = 0$ na secção do canal imediatamente a jusante da superfície inclinada (rampa) representada na Figura 3.16 pela mancha preta. Esta superfície, seguida da presença de ligeiras saliências dispostas transversalmente numa pequena extensão do canal, foi construída com o propósito de garantir as condições de turbulência no escoamento para em estudos experimentais anteriormente realizados no canal.

Para cada uma das secções longitudinais definidas, definiram-se sete posições transversais segundo a direção y . Tendo em conta que o canal possui uma largura de 400 mm, procurou-se afastar as 7 posições transversais de modo a conseguir uma maior cobertura da largura do canal e assim obter mais informação sobre o comportamento do escoamento e da componente longitudinal da velocidade ao longo do canal. Na Figura 3.17 são apresentadas as 7 posições transversais referidas.

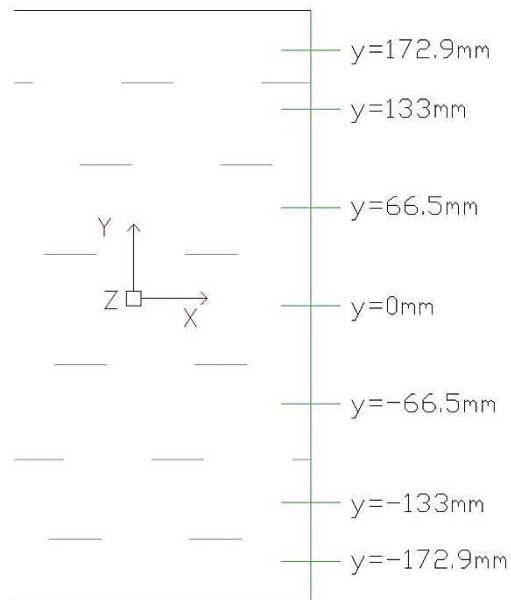


Figura 3.17 - Medições realizadas ao longo do eixo dos yy .

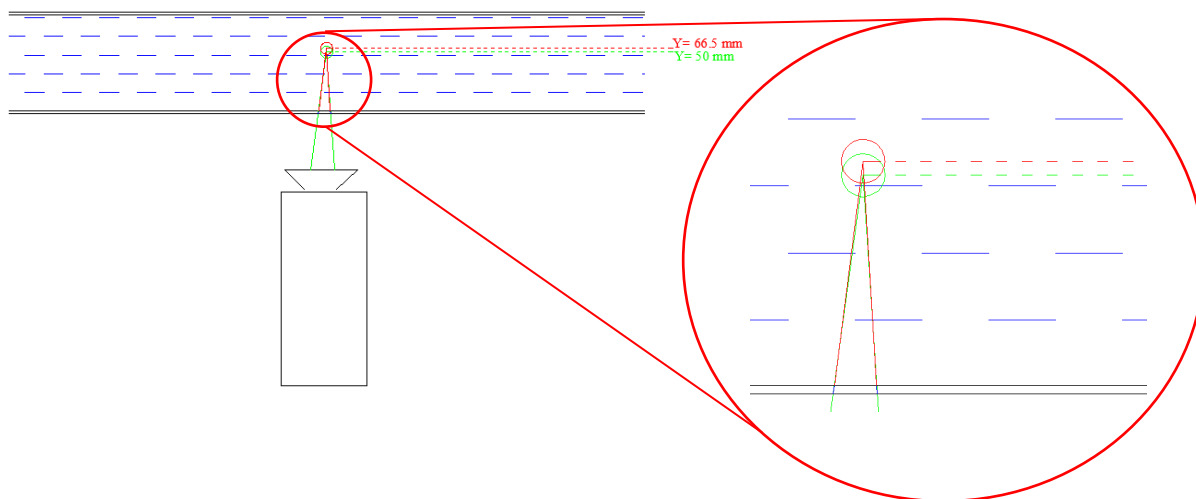
Na definição das sete posições transversais representadas na figura, foi considerado o fenómeno de refração que existe na passagem de um ambiente para outro (ar para água). Este acontecimento impede a consideração para além dos 140mm e implica que as distancias movimentadas, na graduação do sistema de suporte, sejam diferentes daquelas que a intersecção dos feixes do laser se desloca, dentro de água.

Assim, para conhecer os perfis realmente medidos no escoamento, dever-se-á afetar as distâncias da Figura 3.17 com o índice de refração da água, aproximadamente igual a 1,33. A Tabela 1 apresenta a conversão para as posições reais dos perfis transversais medidos.

Tabela 1 - Valores de Y afetados pelo fenômeno de refração.

Y (mm)	Y _{Real} (mm)
130	172.9
100	133
50	66.5
0	0
-50	-66.5
-100	-133
-130	-172.9

Numa análise aos valores obtidos após a afetação do índice de refração da água pode-se concluir que para $y = 130$ mm o valor obtido ($y_{real} = 172.9$ mm) encontra-se muito próximo da parede de vidro do canal ($y_{real\ max} = 200$ mm), o que implica que, para posições de y superiores, a medições de velocidades tornam-se extremamente difíceis devido aos fenômenos óticos, que levam à recepção de sinais no sistema LDA muito reduzidos. A Figura 3.18 ajuda a perceber o fenômeno referido usando como exemplo o ponto $y = 50$ mm.

Figura 3.18 - Exemplo da influência da refração na posição $y = 50$ mm.

Tendo como base a Figura 3.18, os feixes do laser emitidos atravessam a parede de vidro e são refratados, devido à mudança de meio de transmissão (índice de refração do vidro ronda o valor 1,5). No entanto, à saída da parede de vidro os feixes voltam a orientar-se com a mesma direção que tinham antes de atingirem o vidro e portanto a refração existente nesta passagem é anulada. Uma vez na água, o par de feixes sofre uma mudança de direção (linha vermelha) que resulta na passagem do seu ponto de cruzamento para uma posição mais afastada, em comparação com um caso em que não existisse refração (linha verde).

Finalmente, para cada uma das posições medidas longitudinal e transversalmente, definiram-se posições verticais para poder descrever o comportamento do escoamento em função da altura z . Assim, definiram-se pontos de medição de forma a criar um perfil vertical de velocidades, espaçados de 1 mm até um total de 1 cm de cota, depois espaçados de 5 mm desde 1 cm até 3 cm de altura e por fim, espaçados em 1 cm a partir dos 3 cm de altura. Esta distribuição de perfis permite uma caracterização mais pormenorizada na zona próxima do leito rugoso onde as velocidades são mais baixas. A Figura 3.19 apresenta a localização dos pontos nos perfis verticais medidos.

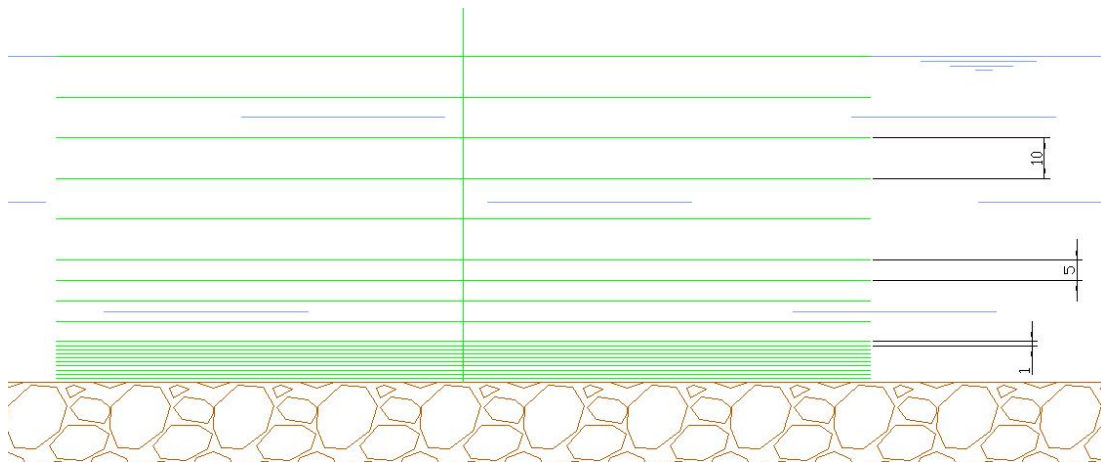


Figura 3.19 - Zonas de medição ao longo do eixo dos zz .

3.6.3. ZONAS DE MEDIÇÃO

Para a aplicação da técnica de medição LDA, é obrigatória a existência de um campo de visão livre e adequado, para que os feixes do raio laser tenham espaço suficiente para entrar na zona a medir e se possa movimentá-los transversalmente quase na totalidade da largura do canal e assim captar com sucesso todas as secções de medição. Houve um cuidado acrescido para que a disposição das hastes nestas zonas não fosse alterado e mesmo assim garantidas as condições necessárias à realização de medições. Assim, foram definidas 6 zonas longitudinais de medição. Estas zonas podem ser divididas em duas zonas iguais compostas por três zonas de medição de largura de 25 mm, 28 mm e 20 mm, de montante para jusante. A Figura 3.20 evidencia a localização das referidas zonas no canal.

A pensar numa fase futura do projeto, nomeadamente a medição da componente transversal das velocidades do escoamento, deixou-se um fundo transparente ao longo da largura do canal nas 6 posições longitudinais referidas com o objetivo de fazer passar os feixes do raio laser de baixo para cima atravessando a placa de fundo transparente. Foi, contudo, assumido o compromisso de que ao longo das larguras definidas para cada zona longitudinal de medição o fundo do canal não estaria coberto com o material rugoso mas sim com material acrílico liso igual ao das placas de fundo do canal com uma espessura de 45 mm, equivalente aos 20 mm da placa de fundo acrescentado da espessura do fundo rugoso, com 25 mm, para que em futuros trabalhos seja possível a medição da componente transversal da velocidade. A afetação nos resultados devido a este compromisso poderá ser algo a ter em conta na análise dos resultados e nas conclusões dos trabalhos, visto que a rugosidade do leito é diferente.

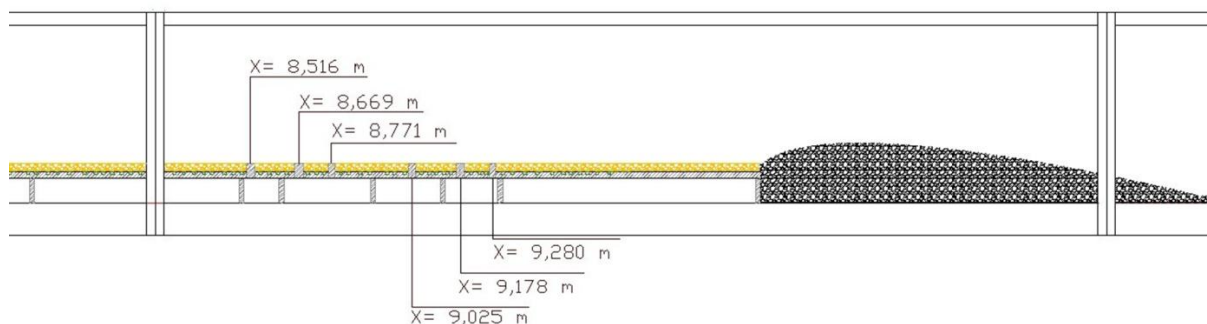


Figura 3.20 - Pormenor para as zonas longitudinais definidas para as medições.

As zonas longitudinais referidas são comuns para os ensaios preliminares e para os ensaios definitivos daí terem sido apresentadas imediatamente antes dos ensaios preliminares. No entanto, para os ensaios preliminares apenas se efetuará medições nas primeiras três zonas representadas na Figura 3.20, ou seja, para $x = 8.516m$, $x = 8.669m$ e $x = 8.771m$. A estas zonas acrescentou-se uma secção que se localiza a montante da região com hastes, $x = 5.465m$.

3.6.4. ENSAIOS PRELIMINARES

Procedeu-se à medição de ensaios preliminares (sem influência da vegetação no canal) nas primeiras três zonas, das anteriormente referenciadas, $x = 8516mm$, $x = 8669mm$ e $x = 8771mm$. É possível observar na Figura 3.29 o canal nas condições referidas. Foi ainda considerada uma secção que antecede a região com a presença de hastes, $x = 5465mm$. Esta secção é objeto de medição, no entanto, pertence à zona do canal imediatamente a montante da presença das hastes, sendo deste modo uma secção de referência para o início da presença de vegetação.



Figura 3.21 - Canal sem presença de vegetação. Ensaios Preliminares.

As posições das medições respeitam o explicitado no ponto 3.6.2. Tendo em conta que se trata de ensaios preliminares, apenas para aferição das condições do escoamento, optou-se por realizar os perfis verticais da velocidade somente para as secções $y = -133mm$, $y = 0mm$ e $y = 133mm$, segundo o eixo transversal.

3.6.4.1. Primeiros Ensaios

3.6.4.1.1 Perfis Verticais

Observação comum em todos os perfis verticais obtidos para ambas as secções, a velocidade junto ao leito rugoso apresenta valores muito reduzidos, como demonstra a Figura 3.22.

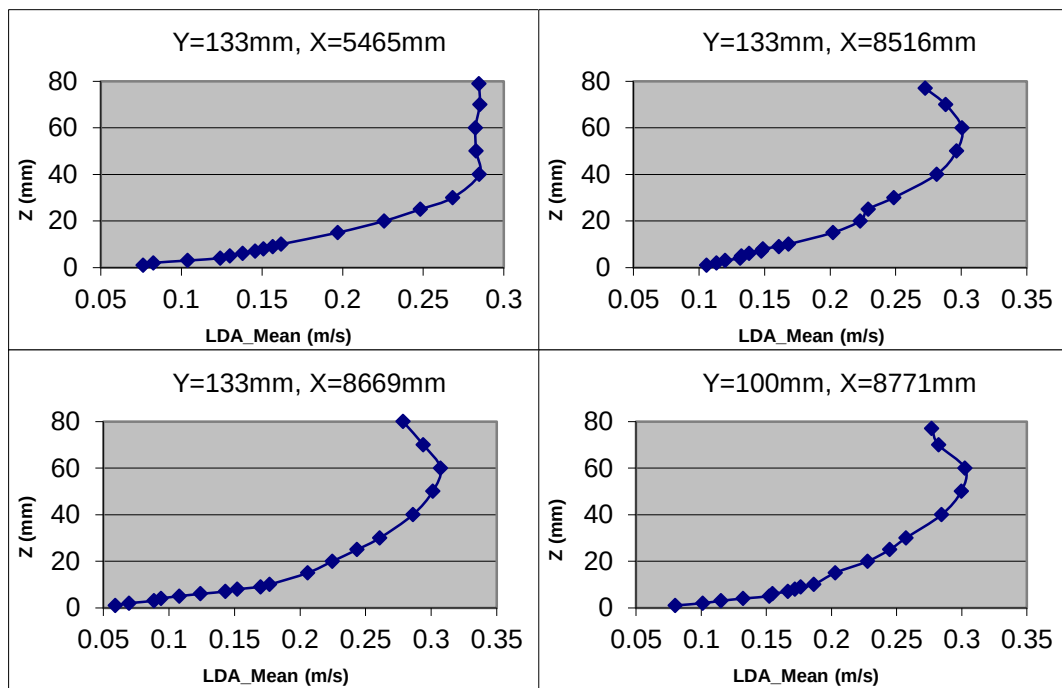


Figura 3.22 - Perfis verticais da componente longitudinal da velocidade para a secção $y = 133\text{mm}$, nas várias posições longitudinais.

Estes valores de velocidade tendem a aumentar progressivamente com a distância ao fundo do canal. Uma teórica zona de estabilização da velocidade pode ser verificada entre as cotas 40mm e 80mm, no perfil para $x = 5465\text{mm}$. Para os restantes perfis existe uma notória redução nos valores de velocidade com o aproximar da superfície livre, o que pode ser explicado pela existência de correntes secundárias.

Nos perfis de velocidades de ambas as posições, para a secção $y = 0\text{mm}$ (Figura 3.23), faz-se notar uma divergência relativamente às restantes secções ensaiadas, que consiste no facto de à medida que nos afastamos do leito do escoamento, a velocidade aumenta, sem se verificar a redução da velocidade junto à superfície livre ou estabilização, como nos exemplos anteriormente referidos (Figura 3.22). As correntes secundárias poderão explicar o observado.

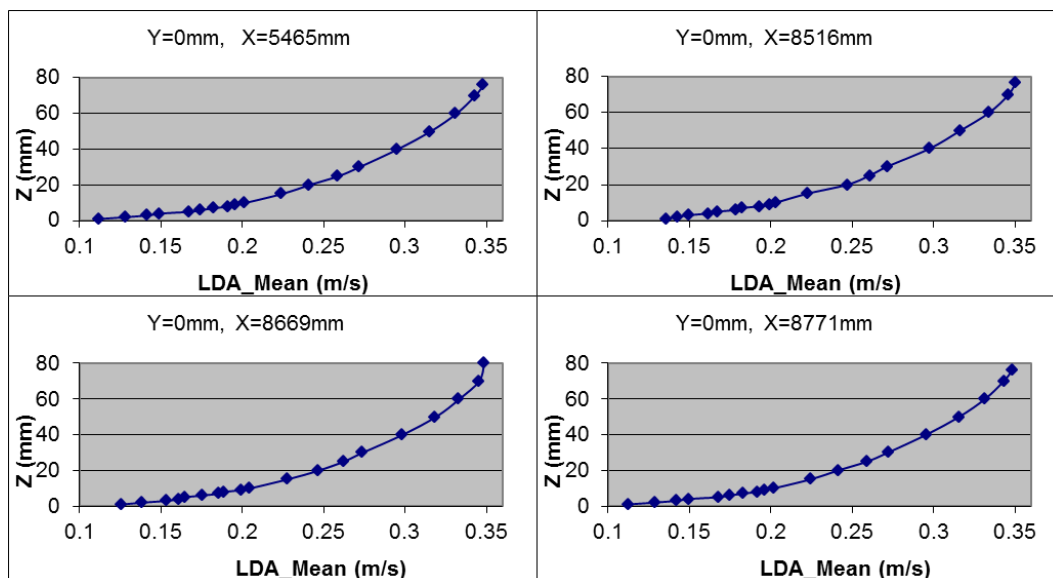


Figura 3.23 - Perfis Verticais da componente longitudinal da velocidade para a secção $y = 0\text{mm}$, nas diferentes posições longitudinais.

3.6.4.1.2 Perfis Transversais

A 40% da altura de escoamento foram realizadas medições para as secções $y = 172,9\text{mm}$, $y = 133\text{mm}$, $y = 66,5\text{mm}$, $y = 0\text{mm}$, $y = -66,5\text{mm}$, $y = -133\text{mm}$ e $y = -172,9\text{mm}$, de forma a obter um perfil transversal da componente longitudinal da velocidade.

Para a primeira posição de medição (posição de referência do início da vegetação), $x = 5465\text{mm}$, o perfil de velocidades obtido (Figura 3.24) encaixa-se num perfil teoricamente esperado para um escoamento turbulento, onde na zona interior do escoamento os valores de velocidade mantêm-se constantes, diminuindo nas zonas junto às paredes.

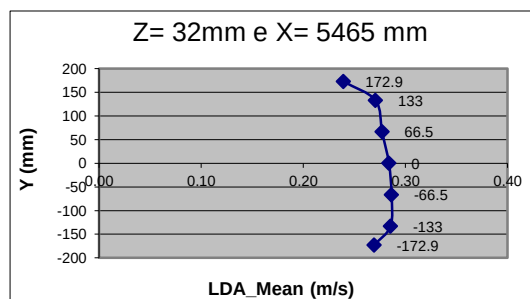


Figura 3.24 - Perfil Transversal da componente longitudinal da velocidade para uma altura de $Z=32\text{mm}$, na posição longitudinal $X=5465\text{mm}$.

A distribuição transversal constante da componente longitudinal da velocidade é verificada. No entanto, para as restantes posições de medição, os perfis apresentam irregularidade na distribuição das velocidades (Figura 3.25).

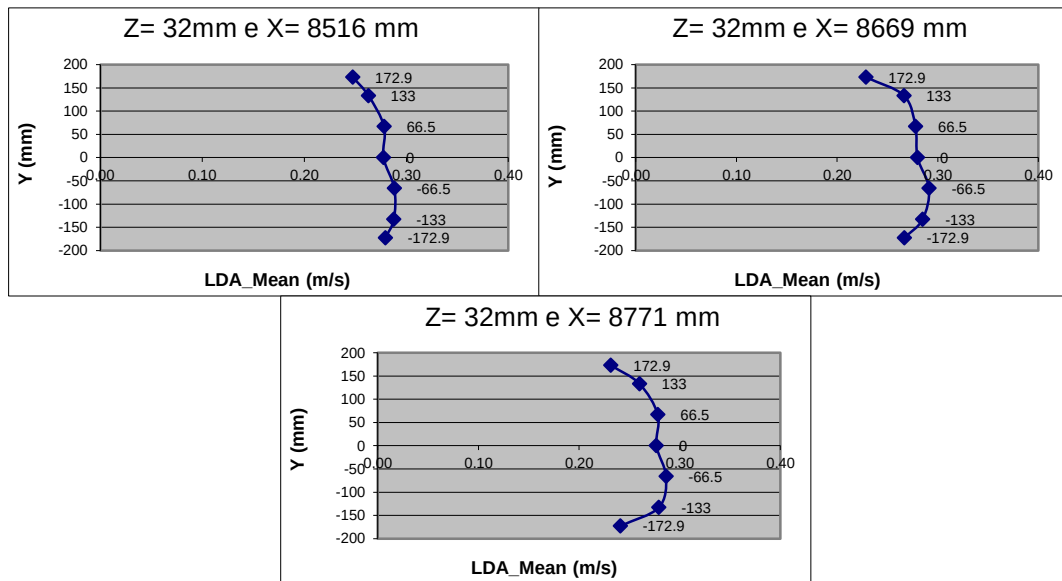


Figura 3.25 - Perfis transversais da componente longitudinal da velocidade, para uma altura de $Z=32\text{mm}$, nas posições $X=8516\text{mm}$ (em cima, à esquerda), $X=8669\text{mm}$ (em cima, à direita) e $X=8771\text{mm}$ (em baixo).

Em $x = 8771\text{mm}$, o perfil obtido assume uma tendência parabólica, que não é coincidente com o perfil teórico esperado, que pode ser exemplificado pela Figura 3.24.

Os resultados conseguidos para os ensaios preliminares após a construção do leito afastam-se do que seria inicialmente previsto, assumindo-se assim que existam incorreções na construção do modelo.

3.6.4.2. Primeira correção ao modelo.

Com o objetivo de aproximar os perfis de velocidades ao obtido na Figura 3.24, procedeu-se à análise do modelo e verificou-se que a orientação dos raios laser não se encontrava paralela com o fundo do canal, podendo ser um fator influente nas inconformidades referidas, constatadas nos perfis de velocidade.

Após a correção ao modelo ter sido feita, inclinando o laser, até que os feixes se encontrassem paralelos com o leito, foi repetido o ensaio para $x = 8669\text{mm}$, de forma a aferir a necessidade de futuras intervenções.

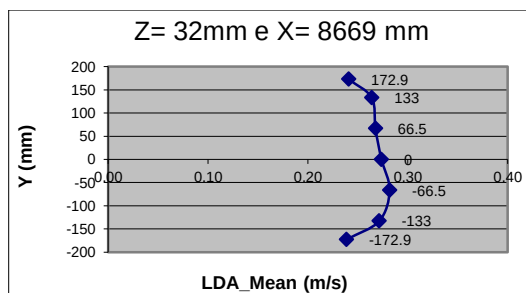


Figura 3.26 - Perfil transversal da componente longitudinal da velocidade, para a altura $Z=32\text{mm}$, na primeira posição $X=8669\text{mm}$, após a primeira correção ao modelo.

Foi, então, obtido o perfil transversal para a componente longitudinal da velocidade. Como mostra a Figura 3.26, em comparação com o perfil obtido no ponto anterior, em que a correção não tinha ainda sido feita, as alterações nos resultados não foram significativas. É ainda possível identificar a assimetria entre os dois lados do escoamento segundo o eixo longitudinal.

Posto este facto, novas intervenções no modelo revelaram-se necessárias.

3.6.4.3. Segunda correção ao modelo

Depois de identificado o não paralelismo entre os raios laser e o leito do canal, e efetuada respetiva correção, foi considerado uma nova incorreção no modelo. A altura de escoamento não se encontrava igual nos dois lados do canal, indicando um possível desnível ou irregularidade do canal.

Através dos apoios reguláveis do canal, alcançou-se uma posição no canal em que a altura do escoamento nas duas paredes do canal tinha um valor igual a 80 mm.

De seguida, procedeu-se à realização da medição do perfil transversal da velocidade para a posição $x = 8669\text{mm}$, tendo sido obtido o perfil representado na Figura 3.27.

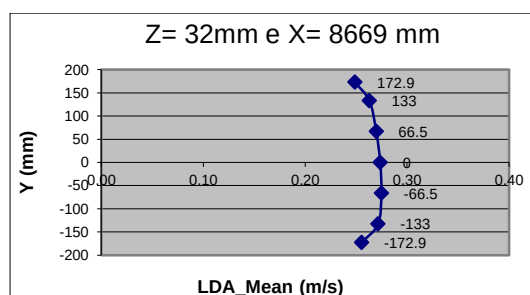


Figura 3.27 - Perfil transversal da componente longitudinal da velocidade para altura $Z=32\text{mm}$, na posição $X=8669\text{mm}$, após a segunda correção ao modelo.

O perfil apresentado demonstra já uma distribuição constante das componentes longitudinais da velocidade, tal como era expectável que ocorresse num escoamento em regime turbulento. No entanto, verificou-se que, com a tentativa de nivelamento do escoamento, as paredes do canal passaram a ter inclinação, não se encontrando totalmente na vertical.

Devido à orientação não vertical das paredes do canal, este ensaio não foi considerado válido, tendo-se procedido a novas correções no canal.

3.6.4.4. Terceira correção ao modelo

Em consequência das referidas tentativas para correção do modelo experimental, optou-se por fazer uma reestruturação do canal.

Procedeu-se, então, à verticalização das paredes laterais do canal, o nivelamento da placa do leito de fundo, com recurso à introdução de duas borrachas funcionando como calços, na extremidade esquerda da placa, perfazendo no total um aumento em altura de 2mm.

A soleira existente sofreu também alterações com o intuito de apresentar uma forma a mais homogênea possível.

Após os trabalhos descritos, regularizou-se novamente o caudal e a altura de escoamento, tendo-se verificado que os raios laser se encontravam paralelos com o leito e o mais perpendicular possível com as paredes do canal. No entanto, a perpendicularidade não foi totalmente garantida com as paredes, contudo, a contribuição da incorreção poderá ser considerada desprezável.

3.6.4.4.1 Perfis Verticais

Depois de realizar todas as correções ao modelo, procedeu-se novamente às medições dos perfis verticais das velocidades. Os resultados obtidos para as três zonas de medição, $x = 8516\text{mm}$, $x = 8669\text{mm}$ e $x = 8771\text{mm}$, não revelaram alterações significativas, relativamente ao aspecto e valores, tendo como base de comparação os resultados apresentados no ponto 3.6.4.1.1, como se pode comprovar na seguinte Figura 3.28.

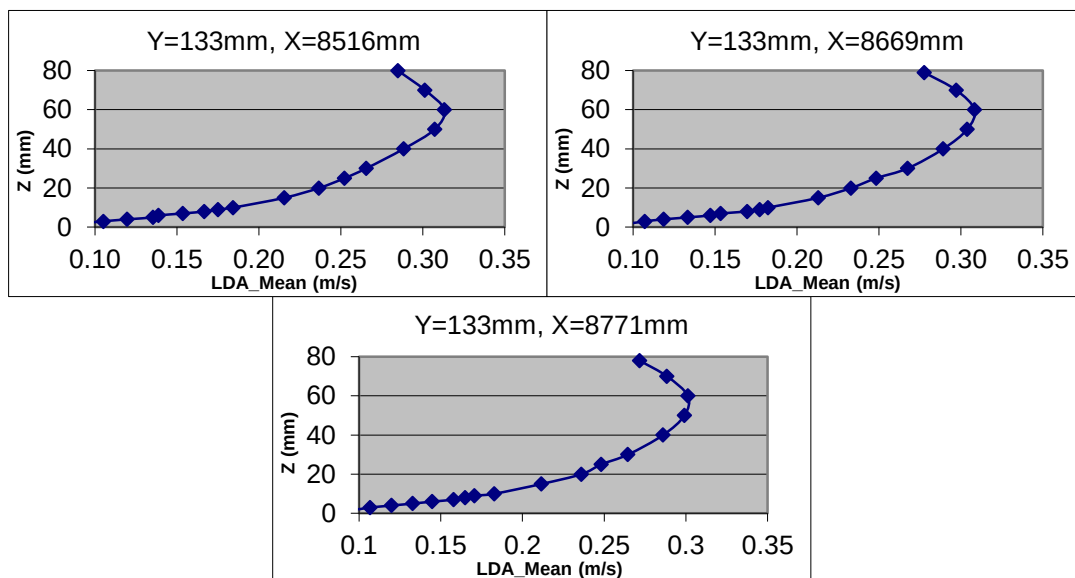


Figura 3.28 - Perfil vertical da componente longitudinal da velocidade, na secção $Y=133\text{mm}$, para a posição $X=8516\text{mm}$ (em cima, à esquerda), $X=8669\text{mm}$ (em cima, à direita) e $X=8771\text{mm}$ (em baixo), após as correcções ao modelo.

3.6.4.4.2 Perfis Transversais

De modo contrário ao caso do ponto anterior, os perfis transversais da componente longitudinal da velocidade modificaram-se de uma forma relevante, comparativamente aos resultados obtidos para os ensaios realizados antes das ações de correção ao modelo.

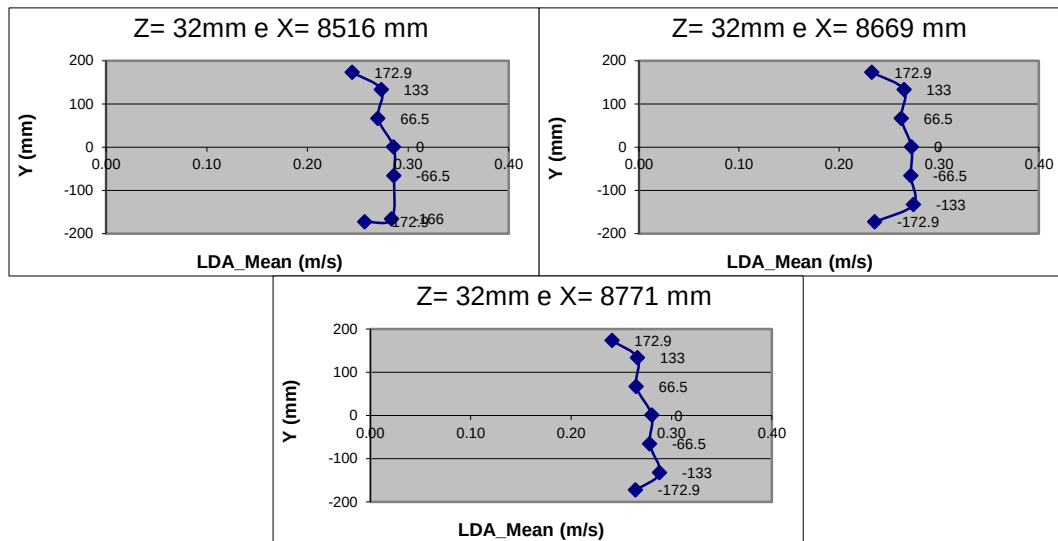


Figura 3.29 - Perfis transversais da componente longitudinal da velocidade para a altura $Z=32\text{mm}$, nas posições $X=8669\text{mm}$ (em cima à esquerda), $X=8516\text{mm}$ (em cima à direita) e $X=8771$ (em baixo), depois das correções ao modelo.

A distribuição constante das velocidades, como se pode verificar na Figura 3.29, foi conseguida de forma evidente para o perfil da posição $x = 8669\text{mm}$, no entanto, para as restantes posições, os valores não representam de modo tão claro o que seria teoricamente esperado.

Contudo, houve uma manifesta melhoria no aspeto dos perfis, demonstrando assim que as correções efetuadas no modelo tiveram resultados profícuos e permitiram fazer uma aferição de irregularidades no modelo que poderiam colocar em causa a validade de futuros ensaios.

3.7. CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DEFINITIVOS

Com a calibração do modelo realizada, procedeu-se então à colocação das hastes no canal e desta forma à construção final do modelo deixando-o ultimado para as medições das três componentes da velocidade do escoamento influenciado pela turbulência causada pela presença das hastes colocadas. A Figura 3.30 apresenta o canal com as hastes colocadas.



Figura 3.30 - Canal de ensaios com a presença de hastes.

3.7.1. LEITO DO CANAL

Numa extensão de cerca de 3.1m e em toda a sua largura do leito, foram cravadas manualmente hastes metálicas na vertical que simulam os caules rígidos de uma zona povoada por vegetação. As hastes são rígidas, cilíndricas e ocas. Têm um diâmetro de 1.1cm e cerca de 20cm de comprimento. São aproximadamente 1370 hastes, como a representada na Figura 3.31, que serão fixadas nas placas de acrílico que foram furadas por máquinas de furação de controlo numero computadorizado.



Figura 3.31 - Haste metálica utilizada para simular vegetação rígida.

Após a colocação das hastes, foi novamente colocado manualmente uma camada de agregado, com as mesmas características do usado para os ensaios preliminares (ponto 3.6.1), formado por cascalho fino com dimensões médias de 4 a 12 mm e uma pequena quantidade de areia. O matéria granular vai assentar nos espaços entre as hastes, formando uma camada com cerca de 2.5cm de espessura, como representa a Figura 3.32.

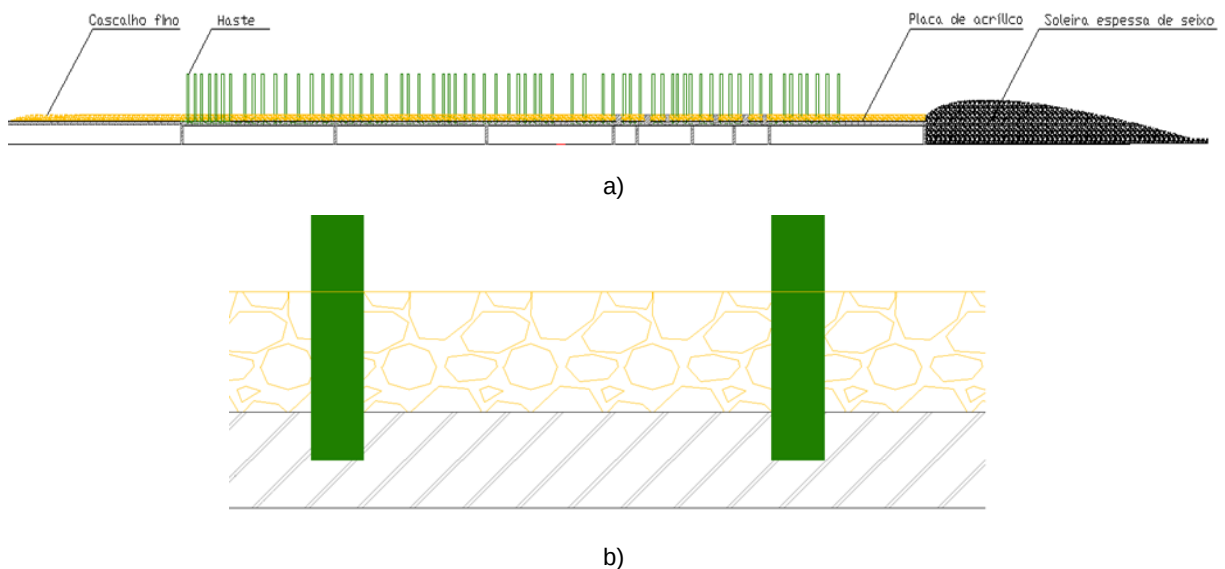


Figura 3.32 - a) Esquema do canal com vegetação rígida; b) Pormenor das hastes na placa de fundo.

Na Figura 3.33 é apresentado o modelo final do leito do canal para o estudo do escoamento em canais com vegetação.



Figura 3.33 - Soleira de jusante e canal com vegetação rígida – vista de jusante (esquerda); Vegetação rígida – vista de cima (direita, canto superior); Vista frontal do canal do laboratório (direita, canto inferior).

3.7.2. ZONAS DE MEDIÇÃO

Já definidas as 6 posições longitudinais a medir, cada uma associada a um perfil transversal, definiram-se as posições das restantes direções axiais. Assim, para a direção transversal (segundo o eixo dos yy) optou-se por medir ao longo de quase toda a largura do canal (desde $Y=172,9$ mm até $Y=-172,9$ mm). Segundo este eixo, as medições foram espaçadas de 13,3 em 13,3 mm ($Y=-172,9$ mm, $Y=-159,6$ mm, $Y=-146,3$ mm e assim continuamente até $Y=172,9$ mm). Por outro lado, para a direção vertical (segundo o eixo dos zz) procurou-se uma definição de espaçamento de pontos de medição que permitissem descrever o escoamento na maioria da sua extensão vertical. Assim, o primeiro ponto de medição localiza-se a 1 mm do leito do canal e os seguintes pontos surgem espaçados de 5 mm até à superfície livre. A Figura 3.34 representa um esquema da secção transversal do canal com as hastes onde estão representados os pontos de medição da malha definida com base no que foi dito anteriormente.

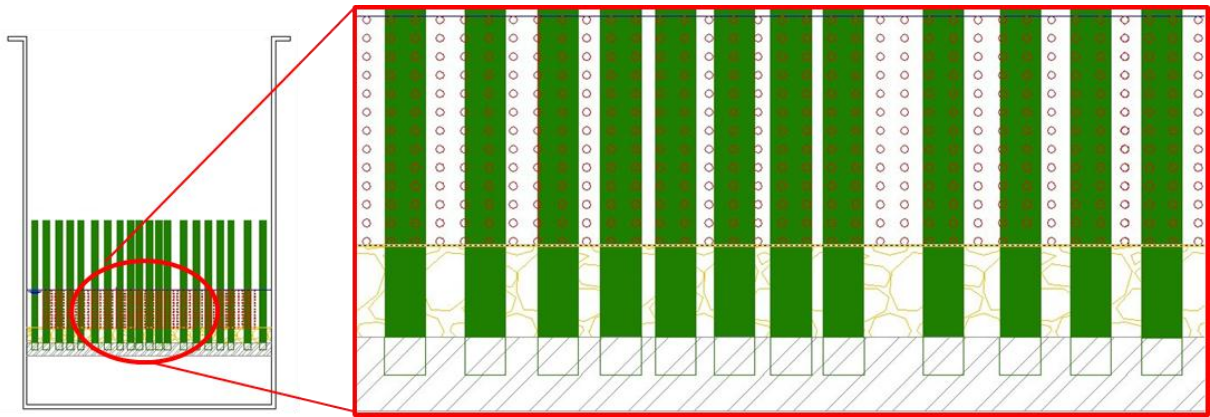


Figura 3.34 - Seção transversal do canal e malha dos pontos de medição definidos.

3.7.3. CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

Na definição das características do escoamento afetado pela presença das hastes, procurou-se reproduzir as mesmas condições definidas nos trabalhos realizados no IST de Lisboa [Ricardo, 2008], nos quais, para além de se obterem velocidades médias na ordem 0.10 m/s e 0.12 m/s, se obtiveram alturas de escoamento na última zona de medição e a jusante da zona de presença de vegetação iguais a 5,2 cm e 5 cm, respetivamente. De forma a obter os mesmos valores, foi necessário impor um caudal próximo dos 2 l/s que permitisse que a altura do escoamento no trecho correspondente às posições longitudinais de medição (intervalo entre $x = 8,516$ m e $x = 9,280$ m) respeitasse as condições referidas para que não se distanciasse dos resultados obtidos no estudo do IST. Posto isto, obtiveram-se alturas de água dentro do intervalo [6,2 cm; 5,2 cm] nas 6 zonas de medição longitudinais definidas, correspondendo aos limites do intervalo às alturas de água na primeira e na última zona de medição. A jusante da zona com presença de vegetação a altura de água é de 5 cm, o que se pode considerar aceitável comparando com os 4,2 cm dos ensaios no IST. A Figura 3.35 evidencia as diferentes alturas de água referidas ao longo do canal.

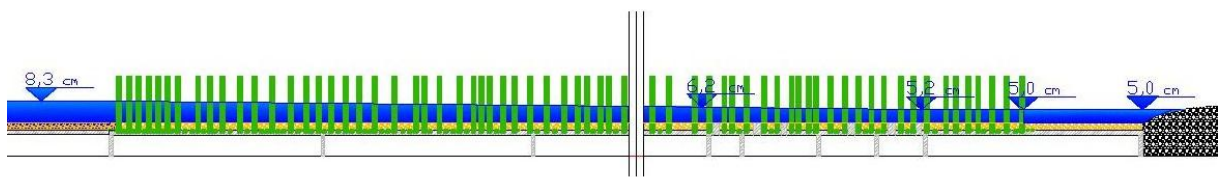


Figura 3.35 - Altura de escoamento nas diferentes secções críticas do canal.

4

CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No presente capítulo pretende-se descrever o modo de caracterização do campo de velocidades com base nos valores obtidos nos ensaios experimentais.

Numa primeira fase, através do programa BSA Flow Software da empresa Dantec Dynamics, foram obtidos os valores das velocidades médias temporais para os vários pontos do escoamento, considerados como definido no subcapítulo 3.7.2.

Posteriormente, recorrendo ao *software* Surfer®, foram criados *contour-maps* referentes a cada uma das zonas de medição, de forma a representar de forma esquemática e de fácil análise a organização dos valores da componente longitudinal da velocidade nas regiões com vegetação.

Na Tabela 2 apresenta-se um resumo das características do escoamento de cada uma das zonas de medição.

Tabela 2 – Características do escoamento em cada zona de medição.

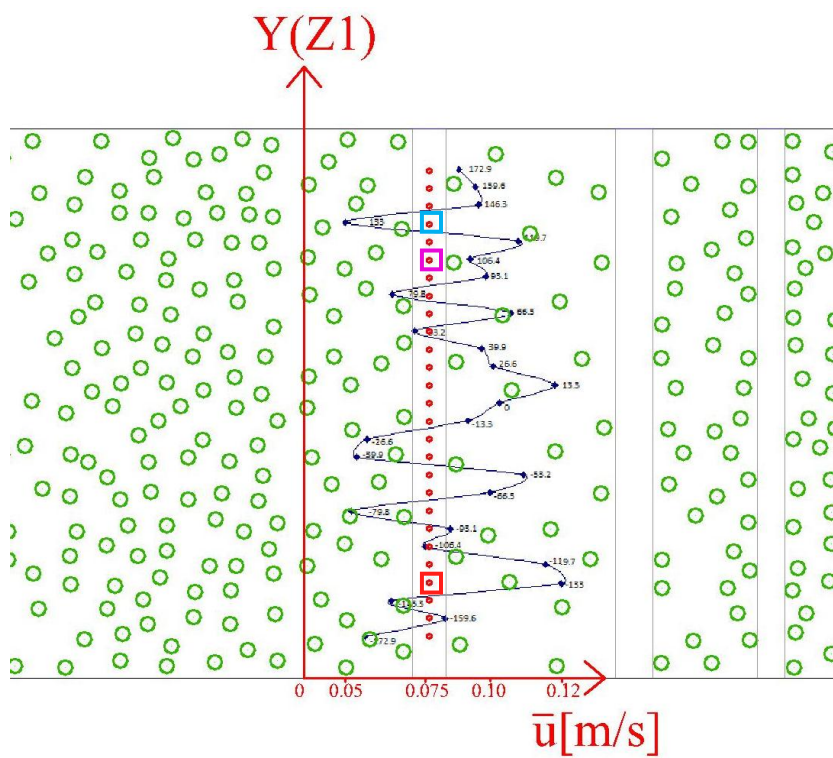
Zona de Medição (m)	Q (m ³ /s)	h (m)	$\bar{u}$ (m/s)
5,915 (Z0)	2	0,083	0,0569
8,516 (Z1)	2	0,062	0,0820
8,669 (Z2)	2	0,063	0,0732
8,771 (Z3)	2	0,061	0,0785
9,025 (Z4)	2	0,057	0,0839
9,178 (Z5)	2	0,055	0,0814
9,280 (Z6)	2	0,052	0,0864

4.2. PERFIS DAS VELOCIDADES MÉDIAS TEMPORAIS

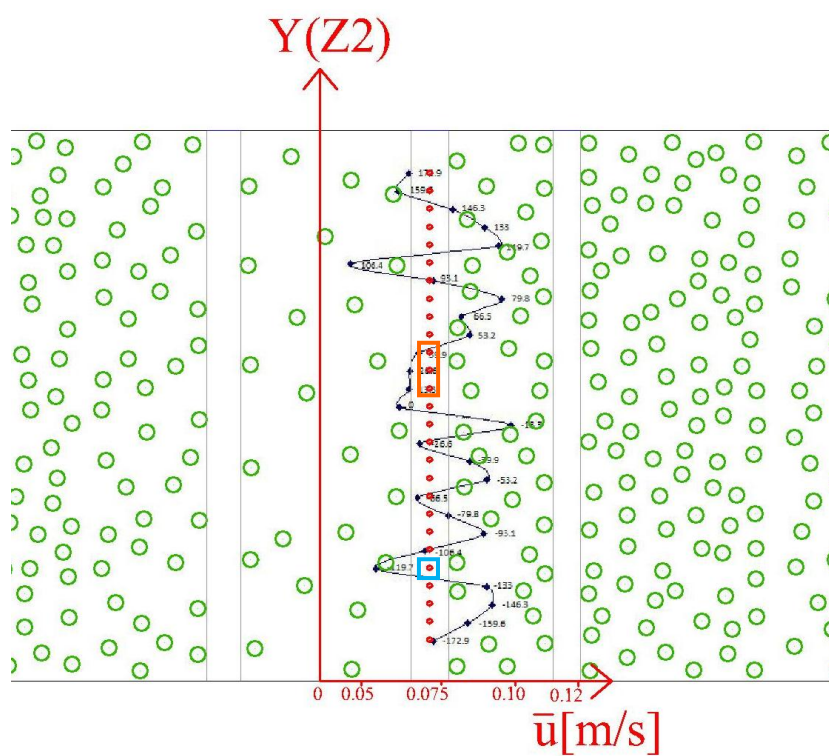
4.2.1. PERFIS TRANSVERSAIS DA VELOCIDADE MÉDIA TEMPORAL

Como primeira abordagem aos dados obtidos nos ensaios concretizados, optou-se por apresentar uma representação da organização dos valores médios temporais da componente longitudinal da velocidade num plano transversal ao escoamento (segundo o eixo dos yy). Esta representação foi inserida na planta esquemática da vegetação do canal, em que cada perfil transversal de velocidades está representado na zona de medição a que corresponde, como representado em Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3. O perfil transversal foi construído utilizando a velocidade média temporal a 40% da altura de escoamento de cada posição de medição.

A organização do esquema permite observar a influência da localização das hastes no comportamento do escoamento.

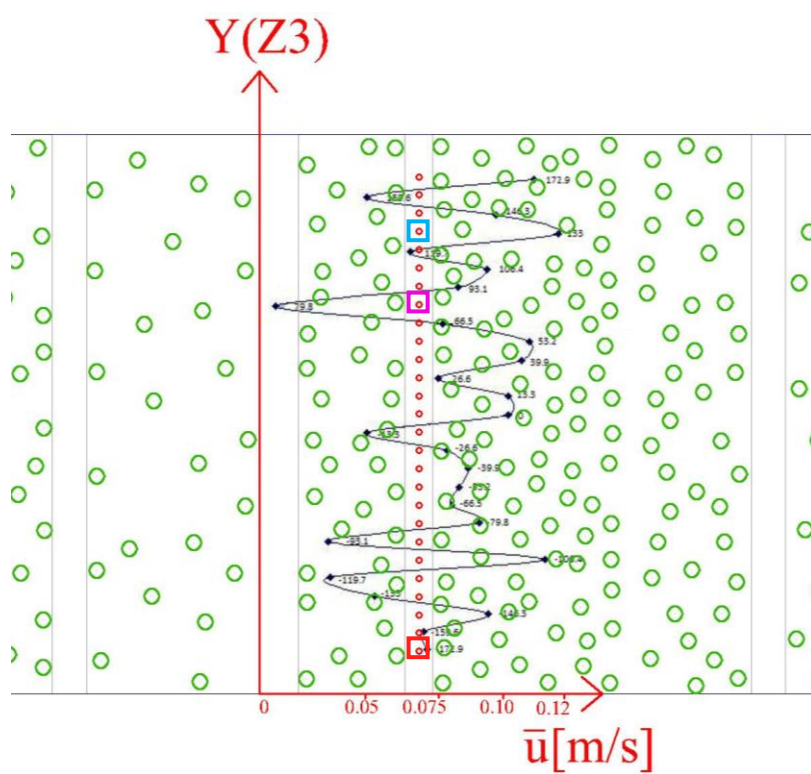


a)

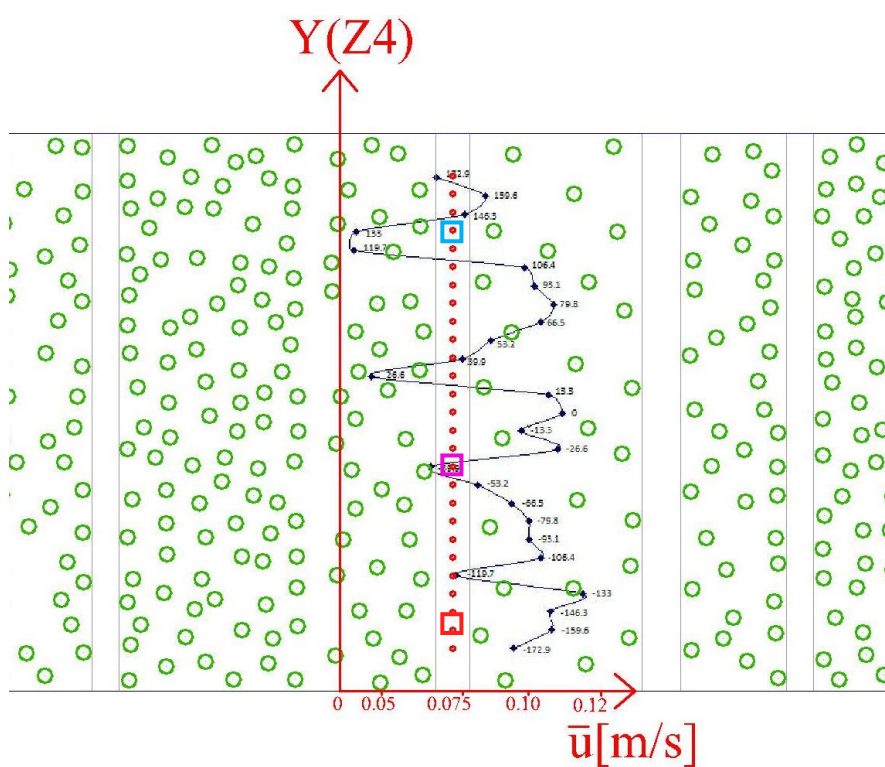


b)

Figura 4.1 – Perfis transversais da Velocidade longitudinal média: a) para $x=8.516\text{m}$ (Z1), b) para $x=8.669\text{m}$ (Z2).

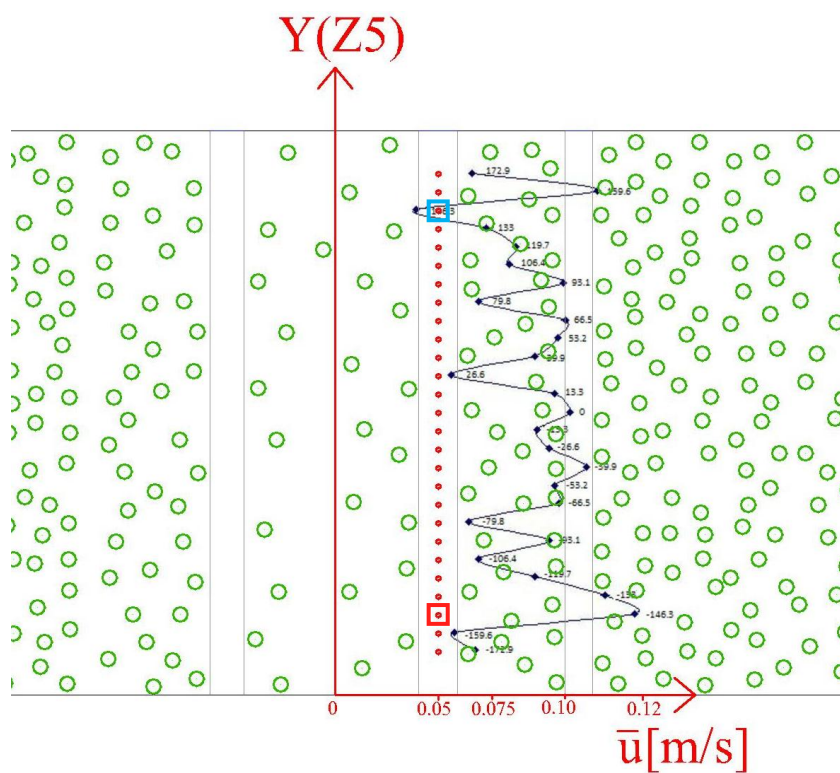


a)

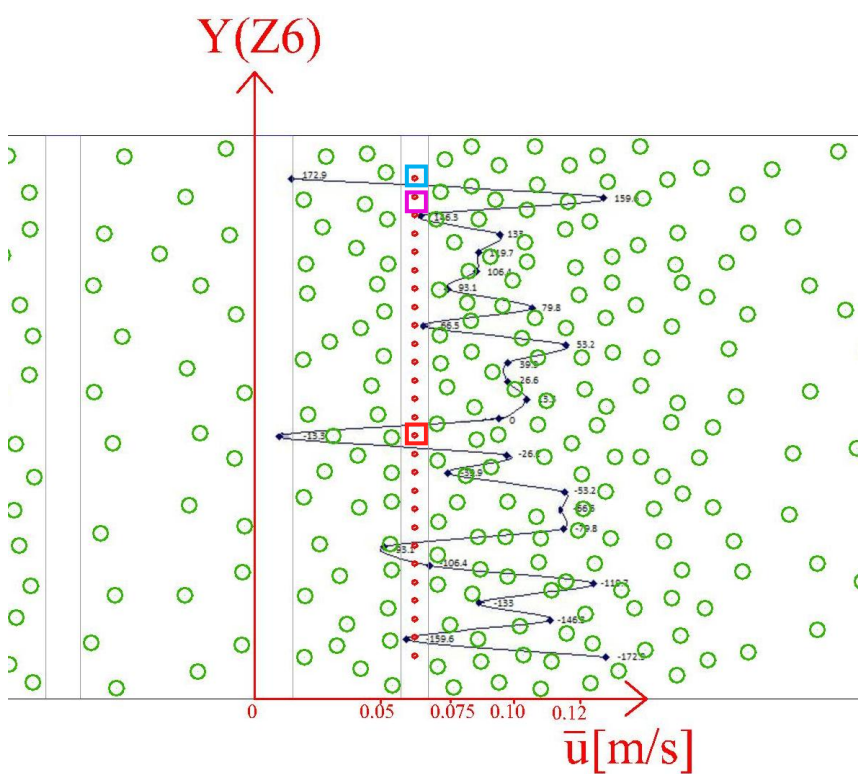


b)

Figura 4.2 – Perfis transversais da velocidade longitudinal média: a) para $x=8.771\text{m}$ (Z3), b) para $x=9.025\text{m}$ (Z4).



a)



b)

Figura 4.3 – Perfis transversais da velocidade longitudinal média: a) para $x=9.178\text{m}$ (Z5), b) para $x=9.208\text{m}$ (Z6).

Através da observação dos perfis apresentados, é visível a influência que a proximidade das hastes à posição de medição, tem nos valores de velocidade medidos. Na zona de medição $x = 8,516\text{m}$ (Z1), este facto pode ser visto comparando a posição $y = 133\text{mm}$ com a $y = -133\text{mm}$ (quadrado azul e vermelho na Figura 4.1 a), respetivamente).

Em $y = 133\text{mm}$ existe uma haste imediatamente a montante do ponto em que decorre a medição e verifica-se que a velocidade registada tem um valor reduzido, comparativamente com os restantes valores apresentados, cerca de $0,05\text{ m/s}$.

Por outro lado, na posição $y = -133\text{mm}$, onde não existe hastes na proximidade, a montante, o valor da velocidade medido é igual a $0,12\text{ m/s}$.

A referida influência torna-se mais visível em zonas com maior densidade de hastes, como na posição $y = 79,8\text{mm}$ da zona de medição $x = 8,771\text{m}$ (Z3), assinalada com o quadrado violeta na Figura 4.2 a), e a posição $y = -13,3\text{mm}$ de Z6 (zona de medição $x = 9,280\text{m}$), assinalada com o quadrado vermelho na Figura 4.3 b). Nestas posições são registados os valores de velocidade mais baixos de cada perfil, $0,021\text{ m/s}$ e $0,013\text{ m/s}$, respetivamente. Ambas as posições têm em comum ter uma haste exatamente a montante do ponto de medição.

Nas posições sem proximidade de hastes a montante, as velocidades são superiores à média, aparentando a criação de corredores, espaços entre hastes com uma elevada velocidade de escoamento [Stoesser et al, 2010]. Estes corredores acentuam-se com o aumento da densidade de hastes [Stoesser et al, 2010], o que pode ser observado quando comparados os perfis de Z1 e Z4 (Figura 4.2 b)) com os perfis de Z3 e Z6. Nas últimas zonas referidas, Z3 e Z6, devido a se situarem em regiões de grande densidade de hastes, denota-se que os valores da velocidade apresentam maior variabilidade quando comparadas posições transversais contíguas, como o exemplo em Z6, da posição $y = 172,9\text{ mm}$ (quadrado azul) e $y = 159,6\text{ mm}$ (quadrado violeta).

Pelo contrário, em $x = 8,669\text{ m}$ (Z2), na Figura 4.1 b), verifica-se uma oscilação menos acentuada, como se pode observar nas 3 posições de medição $y = 39,9\text{ mm}$, $y = 26,6\text{ mm}$ e $y = 13,3\text{ mm}$ (quadrado laranja), onde foram obtidos valores de velocidade aproximadamente iguais.

Consegue-se ainda notar, através da observação da Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3, que a influência da haste na velocidade de escoamento é mais sentida a jusante da mesma do que a montante. Esta influência pode ser constatada quando confrontados os valores obtidos para a velocidade nas posições $y = 133\text{ mm}$ e $y = 106,4\text{ mm}$ de Z1. Na primeira posição há uma haste imediatamente a montante do ponto de medição e na posição $y = 106,4\text{ mm}$ existe uma a jusante.

4.2.2. PERFIS VERTICAIS DA VELOCIDADE MÉDIA TEMPORAL

Através dos valores da componente longitudinal da velocidade média no tempo para as posições de medição definidas anteriormente no subcapítulo 3.7.2, construiu-se também um perfil vertical das velocidades para cada posição medida no eixo dos yy . Com os referidos perfis é possível observar a variação do valor da velocidade longitudinal com a altura e complementar a análise dos perfis transversais apresentados no subcapítulo anterior.

A Figura 4.4 apresenta três perfis verticais da componente longitudinal da velocidade de três posições na zona de medição Z1.

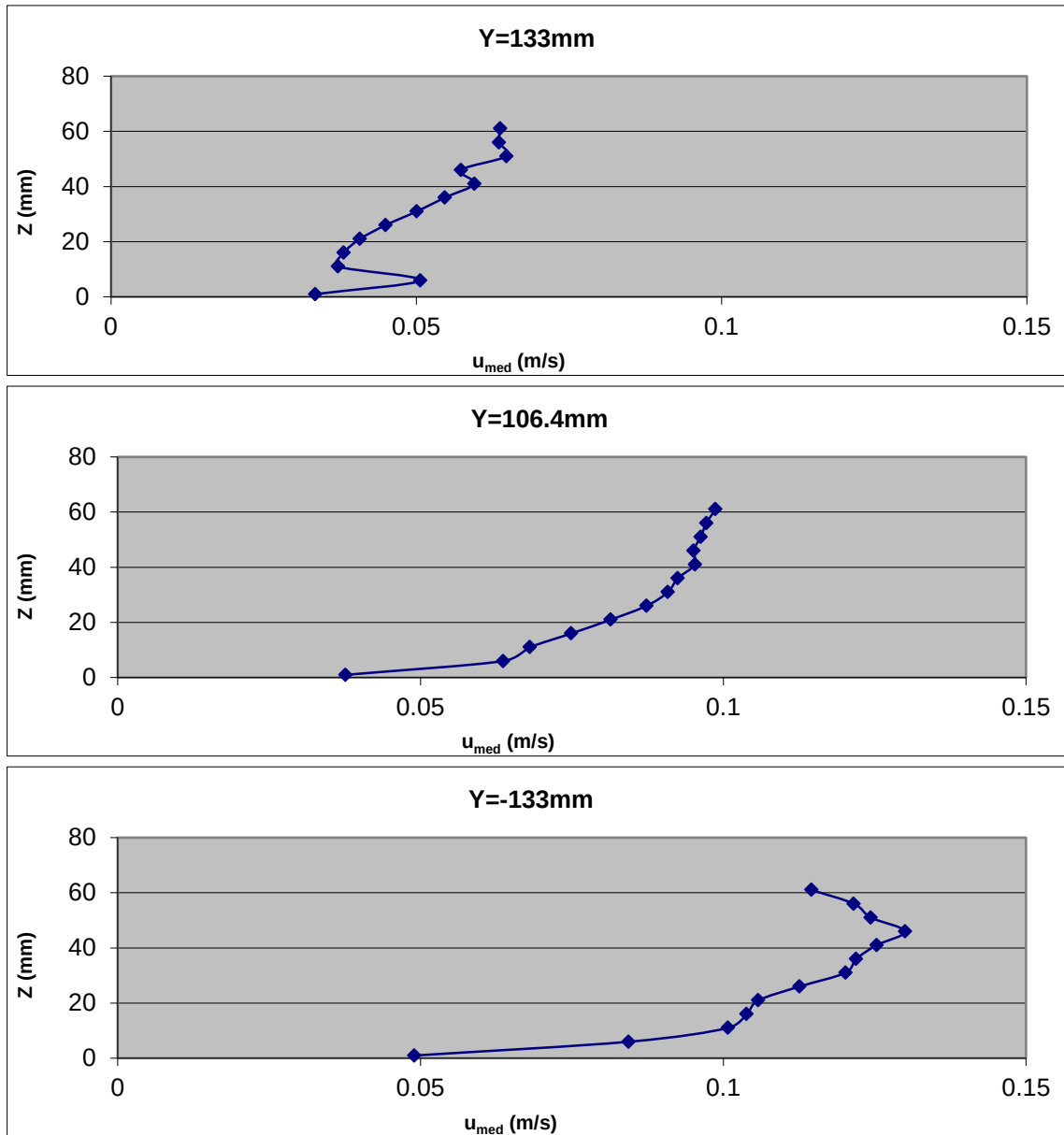


Figura 4.4 – Perfis verticais da velocidade média temporal de Z1 para: $y = 133\text{mm}$, $y = 106,4\text{mm}$ e $y = -133\text{mm}$.

Como referido no subcapítulo 4.2.1, os perfis de $y = 133\text{mm}$ e $y = -133\text{mm}$ na Figura 4.4, representam na Figura 4.1 duas situações, um ponto de medição com uma haste imediatamente a montante e um ponto de medição sem presença de haste a montante, respetivamente. Comparando os dois perfis é possível observar diferenças em termos de formato e valores obtidos. Para $y = 133\text{mm}$ a velocidade máxima registada foi de $0,06\text{m/s}$, sendo a velocidade média do perfil, $\bar{u}_{y=133\text{mm}}$, igual a $0,05\text{m/s}$. Por outro lado, para $y = -133\text{mm}$, a velocidade máxima registada foi de $0,013\text{m/s}$ e a velocidade média do perfil tem o valor de $\bar{u}_{y=-133\text{mm}} = 0,12\text{m/s}$. A menor turbulência registada neste perfil pode ser explicado pelos valores de velocidade medidos, que são superiores aos obtidos para $y = 133\text{mm}$ [Stoesser et al, 2010].

Seguindo com a análise cruzada dos perfis verticais apresentados, na posição de medição $y = 106,4\text{mm}$ a velocidade máxima registada foi de $0,098\text{m/s}$, sendo $\bar{u}_{y=106,4\text{mm}} = 0,09\text{m/s}$, valores

consideravelmente superiores aos conseguidos para a posição $y = 133\text{mm}$. É também possível observar, através da comparação dos dois perfis mencionados, que para $y = 106,4\text{mm}$ o valor da velocidade estabiliza a partir de aproximadamente 40% da altura de escoamento. Por seu turno, como já referido, em $y = 133\text{mm}$ o perfil vertical da componente longitudinal da velocidade apresenta grande variação nos valores obtidos. Este facto pode-se dever à diferente localização das posições de medição, em $y = 106,4\text{mm}$ existe uma haste exactamente a jusante do ponto e em $y = 133\text{m}$, como já citado, existe uma exactamente a montante da posição.

Para a posição Z2, estão representados na Figura 4.5 três perfis verticais da velocidade média temporal de três posições medidas.

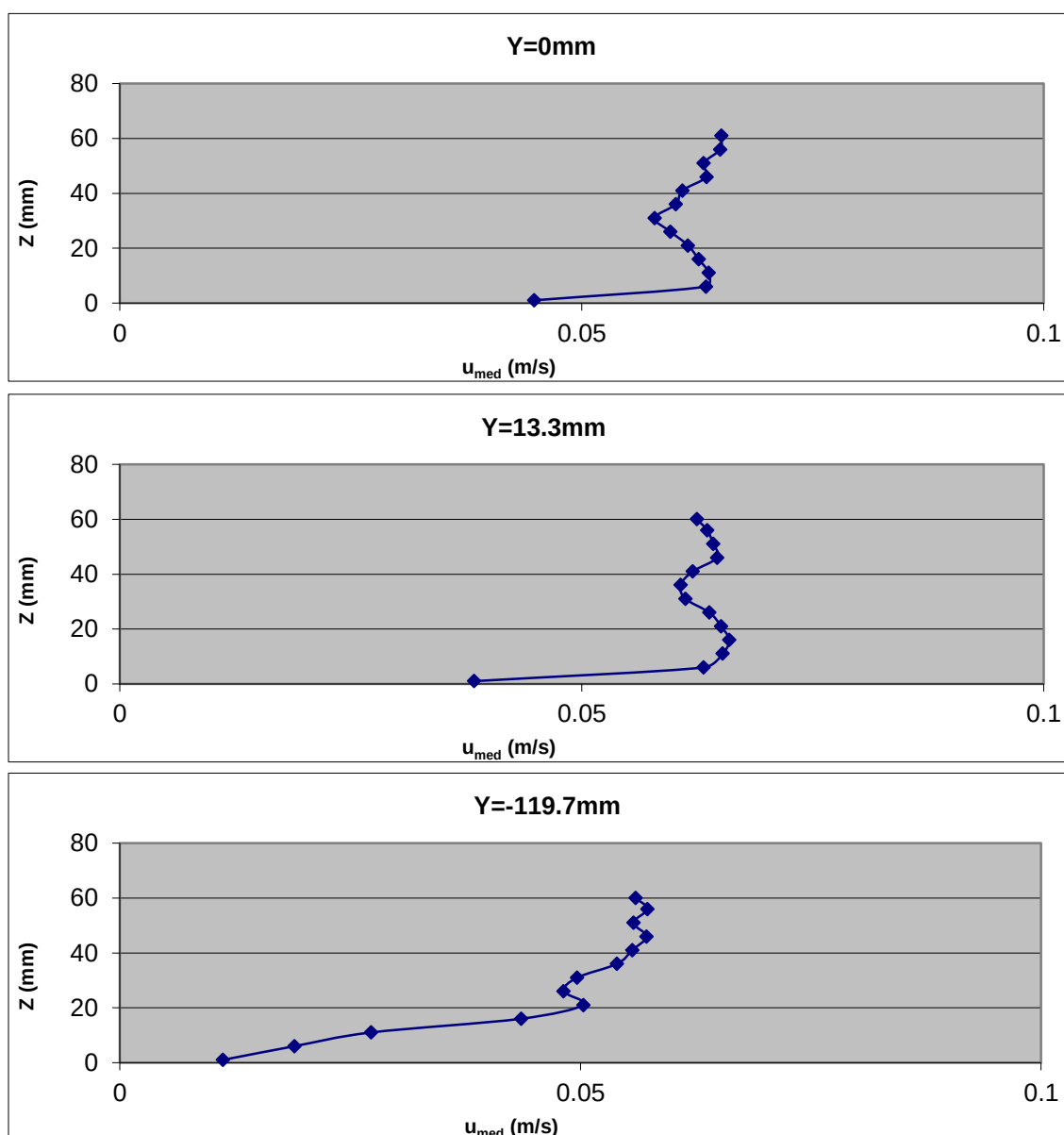


Figura 4.5 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z2 para: $y = 0\text{mm}$, $y = 13,3\text{mm}$ e $y = -119,7\text{mm}$.

Encontram-se representados dois perfis vizinhos, na Figura 4.5, são eles $y = 0\text{mm}$ e $y = 13,3\text{mm}$. Têm a singularidade de serem perfis idênticos tanto em configuração como em valores obtidos, para $y = 13,3\text{mm}$ $\bar{u}_{y=13,3\text{mm}} = 0,064\text{m/s}$ enquanto que para $y = 0\text{mm}$, $\bar{u}_{y=0\text{mm}} = 0,063\text{m/s}$. Segundo a Figura 4.1 b) (quadrado laranja), verifica-se que os referidos perfis encontram-se num local sem presença de hastes a montante, o que pode ser um fator explicativo para a manutenção das condições de escoamento entre as duas posições contíguas.

Apresenta-se na Figura 4.5 o perfil vertical da componente longitudinal das velocidades na posição de medição $y = -119,7\text{mm}$ (quadrado azul na Figura 4.1 b)). Situando-se entre duas hastes (uma a montante e outra a jusante da posição), os valores das velocidades medidas apresentam um aumento linear até aos 20mm de altura assumindo depois valores afetados por eventuais turbulências existentes devido à proximidade da haste a montante., sendo $\bar{u}_{y=-119,7\text{mm}} = 0,05\text{m/s}$.

Na Figura 4.6 mostra-se os perfis verticais de três posições para Z3.

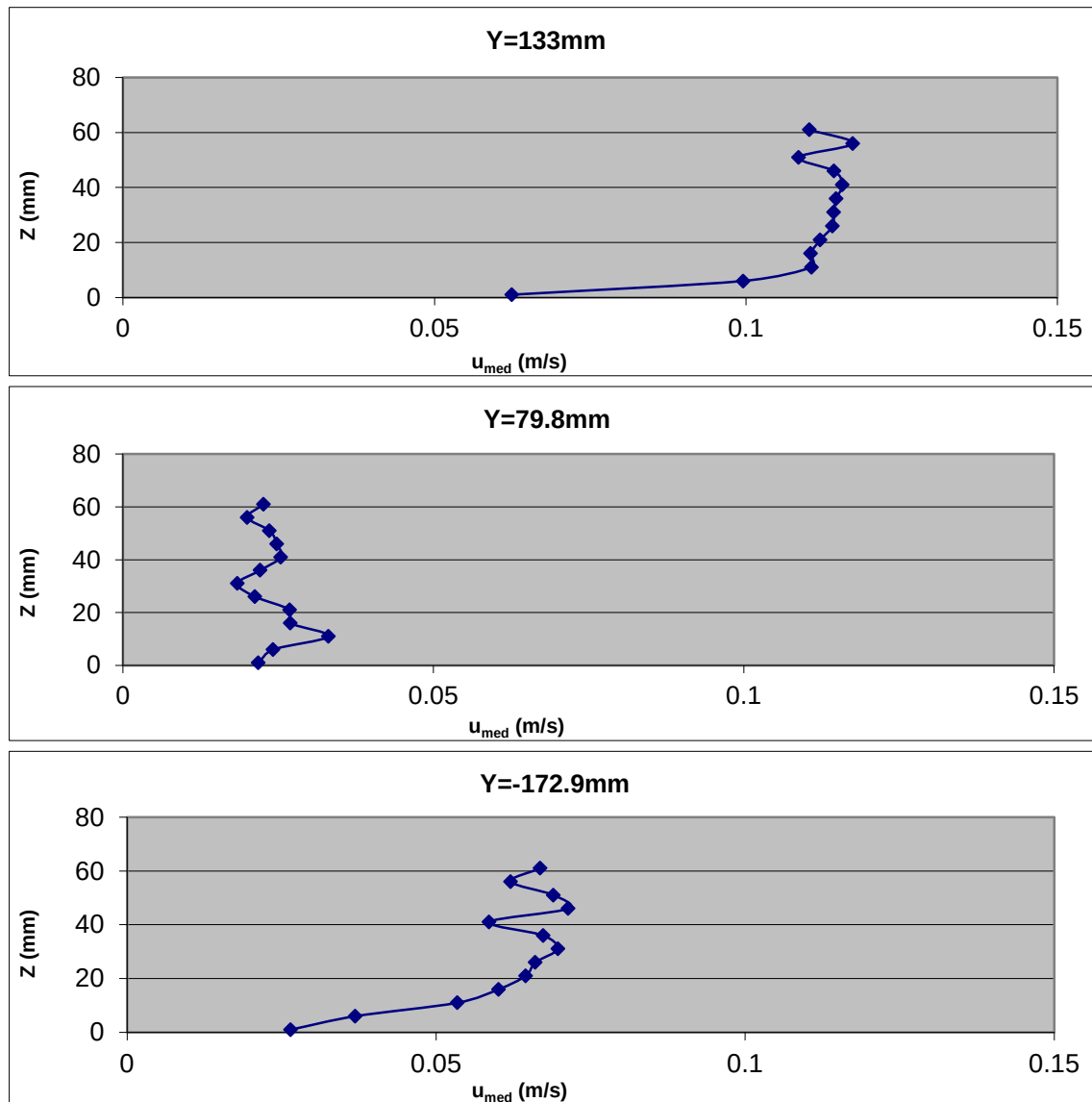


Figura 4.6 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z3 para: $y = 133\text{mm}$, $y = 79,8\text{mm}$ e $y = -172,9\text{mm}$.

O perfil correspondente à posição $y = 79,8\text{mm}$ (Figura 4.6) apresenta uma velocidade média, $\bar{u}_{y=79,8\text{mm}}$, igual a $0,024\text{m/s}$, muito inferior à velocidade média registada para Z3, $0,0785\text{m/s}$. O facto de a posição de medição se encontrar com uma haste imediatamente a montante e de se tratar de uma zona com grande densidade de hastes (Figura 4.2 a), quadrado violeta), pode ser uma razão para explicar os valores obtidos e para suportar a grande variação nos valores da velocidade ao longo da altura de escoamento., registada no perfil.

Em situação contrária encontra-se a posição $y = 133\text{mm}$, que se situa no seguimento do espaço livre entre duas hastes, a montante (Figura 4.2 a), assinalada com o quadrado azul). A velocidade média registada para o perfil foi de, $\bar{u}_{y=133\text{mm}} = 0,11\text{m/s}$, quatro vezes superior à velocidade registada para o perfil de $y = 79,8\text{mm}$. Assim o perfil (Figura 4.6) apresenta um crescimento da velocidade nos primeiros 10mm , que corresponderá à zona afetada pela rugosidade do leito, e de seguida uma estabilização para um valor de velocidade igual a $0,11\text{m/s}$.

O perfil vertical de velocidades para $y = -172,9$, cuja posição se encontra numa zona com hastes tanto a montante como a jusante (Figura 4.2 a), quadrado vermelho), apresenta um gráfico de velocidades (Figura 4.6) com presença de turbulências a partir da cota $z = 20\text{mm}$, que pode ser fruto da sua, já referida, localização.

Na figura seguinte (Figura 4.7) apresenta-se os perfis verticais escolhidos dos medidos na zona de medição Z4.

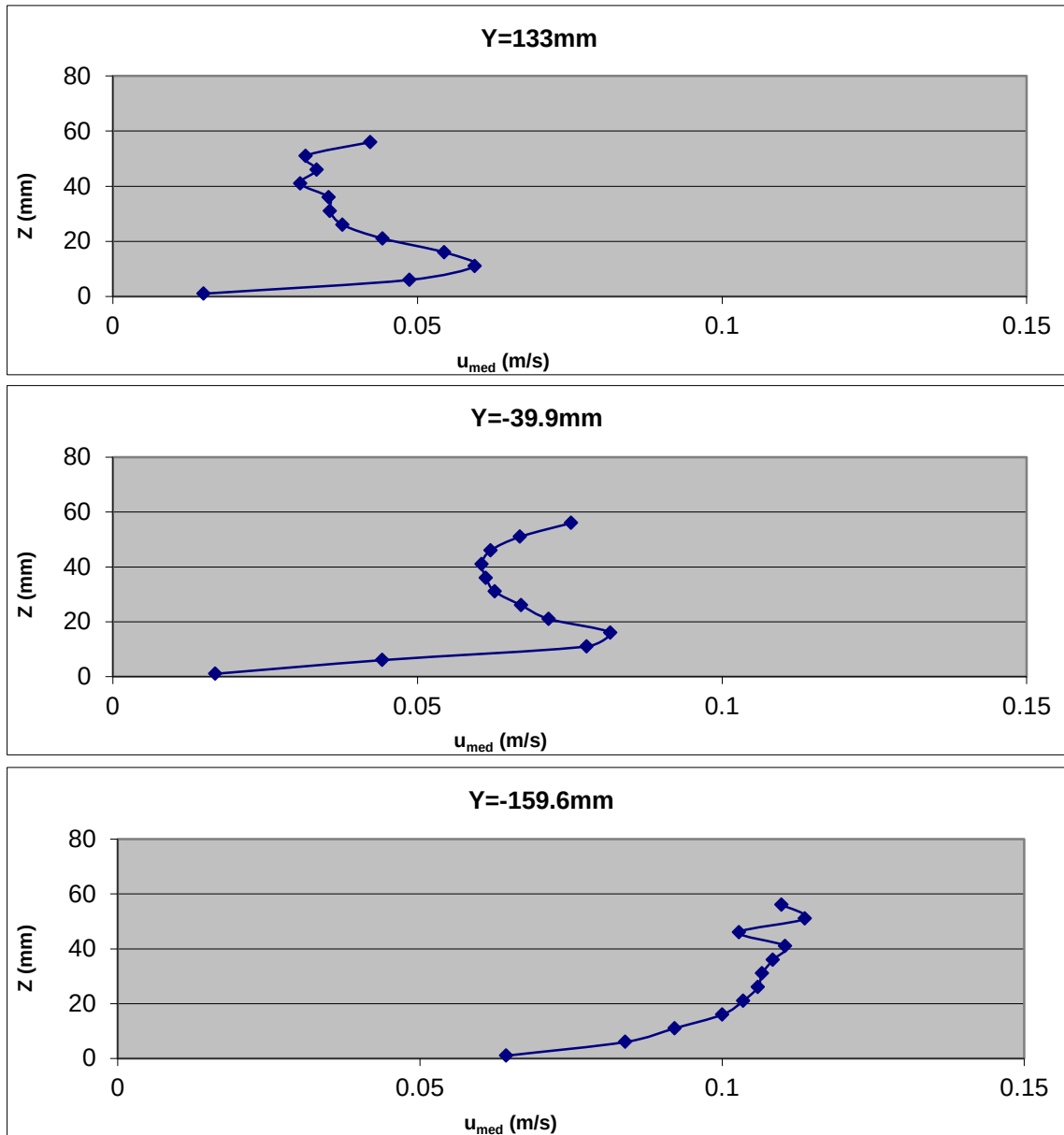


Figura 4.7 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z4 para: $y = 133\text{mm}$, $y = 39,9\text{mm}$ e $y = -159,6\text{mm}$.

Comparando o perfil da posição $y = 133\text{mm}$ com o da posição $y = -39,9\text{mm}$ (Figura 4.7), é visível que a forma dos dois perfis é similar, embora com maior turbulência nos valores da posição $y = 133\text{mm}$, onde $\bar{u}_{y=133\text{mm}} = 0,037\text{m/s}$, inferior à velocidade registrada para $y = -39,9\text{mm}$, $\bar{u}_{y=-39,9\text{mm}} = 0,065\text{m/s}$. Os valores apresentados podem ser justificados com a localização das posições consideradas no canal (Figura 4.2 b), o quadrado azul mostra $y = 133\text{mm}$ e o violeta mostra $y = -39,9\text{mm}$, a posição $y = 133\text{mm}$ encontra-se a jusante de uma zona com maior densidade de hastes, comparativamente com a posição $y = -39,9\text{mm}$, que a montante tem uma haste isolada.

O perfil vertical da posição $y = -159,6\text{mm}$ (Figura 4.7), com velocidade média $\bar{u}_{y=-159,6\text{mm}} = 0,10\text{m/s}$, apresenta forma exponencial, encontrando-se numa zona sem presença de hastes a montante e com uma haste a jusante (Figura 4.2 b), assinalada com quadrado vermelho).

São representados na Figura 4.8 os perfis verticais para três posições da zona de medição Z5.

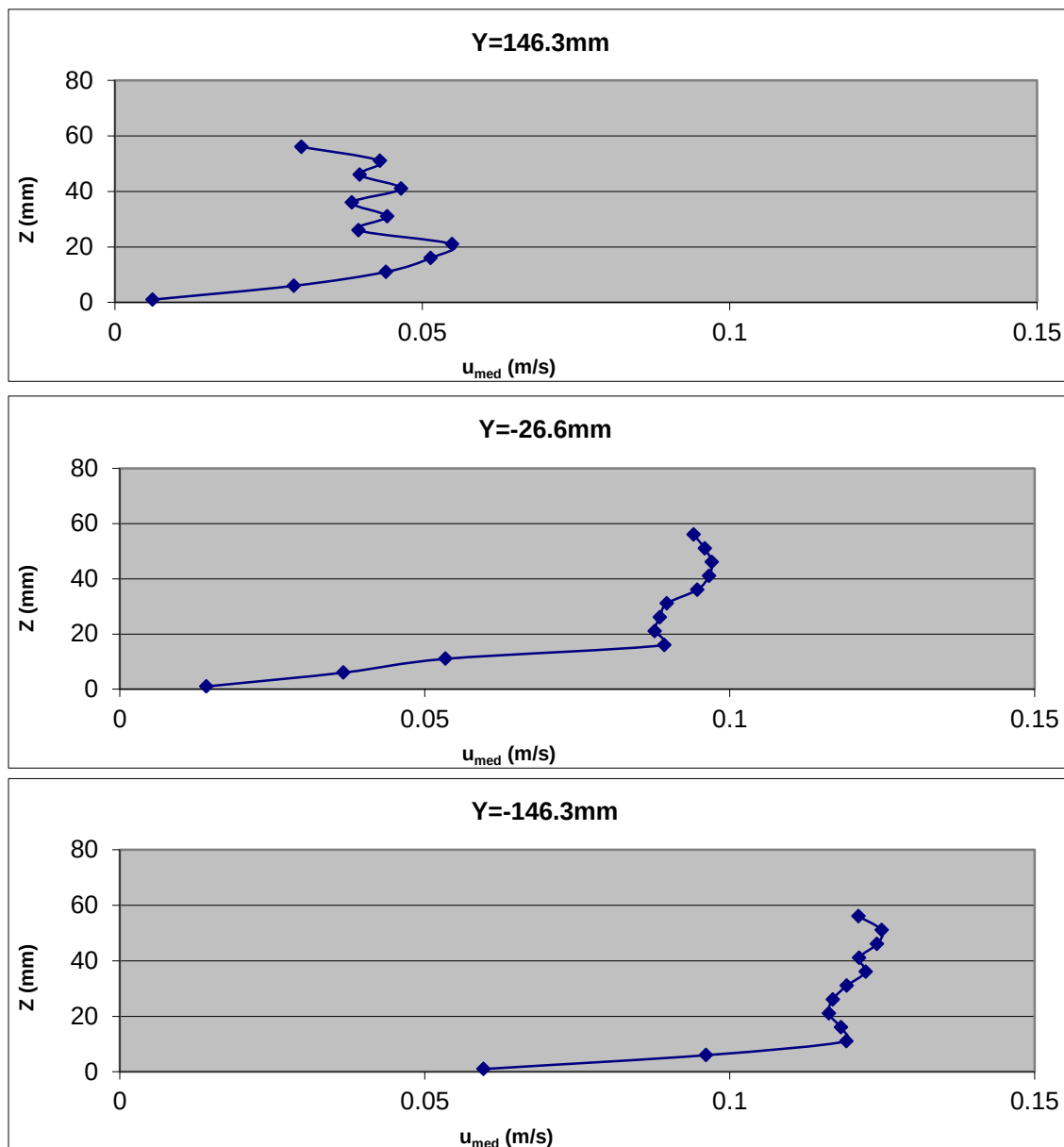


Figura 4.8 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z5 para: $y = 146,3\text{mm}$, $y = -26,6\text{mm}$ e $y = -146,3\text{mm}$.

O perfil para a posição $y = -146,3\text{mm}$ (Figura 4.8) foi o que registou os maiores valores de velocidade da zona de medição $x = 9,178\text{m}$. Através da observação da Figura 4.3 a) (quadrado vermelho) é perceptível que a posição em questão não tem hastes a montante nem imediatamente a jusante, explicando-se assim a velocidade média registada, $\bar{u}_{y=-146,9\text{mm}} = 0,12\text{m/s}$, muito superior á registada para a zona de medição em que se insere, $0,0814\text{m/s}$.

A posição inversa da anteriormente referida, $y = 146,3\text{mm}$, apresentou-se como sendo o perfil vertical de velocidades com a menor velocidade média de toda a zona de medição, $\bar{u}_{y=146,3\text{mm}} = 0,041\text{m/s}$. Embora a posição não tenha a presença de hastes imediatamente a montante, o facto de se encontrar numa zona de transição entre uma região com reduzida densidade de hastes e uma com elevada densidade, pode ajudar a interpretar os valores obtidos (quadrado azul, Figura 4.3 a)).

No perfil $y = -26,6\text{mm}$ (quadrado violeta, Figura 4.3 a)), embora apresente uma forma regular em que a velocidade estabiliza na casa dos $0,09\text{m/s}$, verifica-se um elevado aumento de velocidade entre o leito de escoamento e a cota em que a velocidade do fluido se torna estável ($z = 20\text{mm}$). Este acontecimento pode dever-se a irregularidades existentes no nivelamento do material granular constituinte do leito.

Na Figura 4.9 são demonstrados três perfis verticais dos valores médios temporais da componente longitudinal da velocidade na zona de medição Z6.

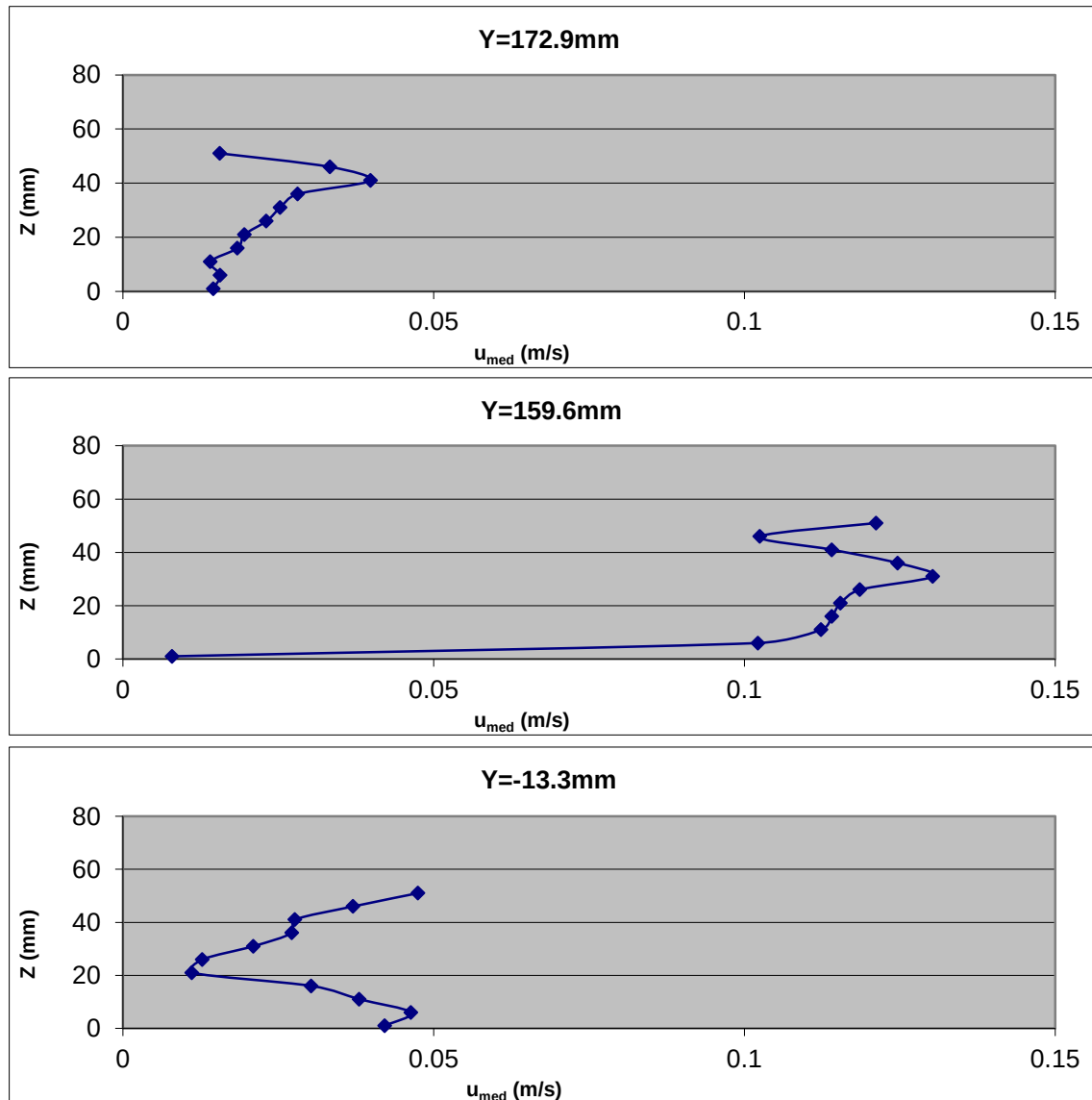


Figura 4.9 - Perfis verticais da velocidade média temporal de Z6 para: $y = 172,9\text{mm}$, $y = 159,6\text{mm}$ e $y = -13,3\text{mm}$.

Na posição $y = -13,3\text{mm}$ foi registado um perfil vertical de velocidades com uma configuração diferente dos restantes obtidos (Figura 4.9). Esta configuração do perfil pode-se dever ao facto de se encontrar justamente a jusante de uma haste e numa região com elevada densidade de hastes (Figura

4.3 b), posição assinalada com quadrado vermelho), facto que também explica também os reduzidos valores de velocidade obtidos.

Tal como no caso anterior, a posição $y = 172,9\text{mm}$ situa-se logo a jusante de uma haste (Figura 4.3 b), quadrado azul). Conforme o que seria de esperar, as velocidades medidas para o perfil (Figura 4.9) foram em muito inferiores ao valor da velocidade média da zona de medição a que pertence, sendo $\bar{u}_{y=172,9\text{mm}} = 0,021\text{m/s}$ e a velocidade média de Z6 tem o valor de $0,0864\text{m/s}$.

A posição vizinha a $y = 172,9\text{mm}$, com o perfil vertical apresentado na Figura 4.9 ($y = 159,6\text{mm}$), apresenta valores de velocidade muito superiores à posição contígua. Torna-se assim pertinente a comparação das localizações no canal de ambas as posições (Figura 4.3 b), $y = 159,6\text{mm}$ assinalada pelo quadrado violeta), de forma a compreender a razão da diferença radical encontrada nos valores medidos. Como já referido, a posição $y = 172,9\text{mm}$ está situada imediatamente a jusante de uma haste, por seu turno, na posição $y = 159,6\text{mm}$ não existe nenhuma haste a montante, estando situada no espaço existente entre duas hastes, factor que pode explicar a velocidade média registada, $\bar{u}_{y=159,6\text{mm}} = 0,11\text{m/s}$, superior à obtida para a zona de medição em que se insere.

4.2.3. CONTOUR MAPS

Após a obtenção de todos os perfis verticais da componente longitudinal da velocidade, os dados foram coletados no programa Surfer®, que através dos vários pontos medidos cria o *contour map* de cada zona de medição.

Na Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12 são apresentados os *contour maps* para as 5 diferentes zonas de medição. Os mapas demonstram de forma gráfica a distribuição dos valores da velocidade ao longo da zona de medição, sendo que representam uma vista sobre o escoamento de jusante para montante.

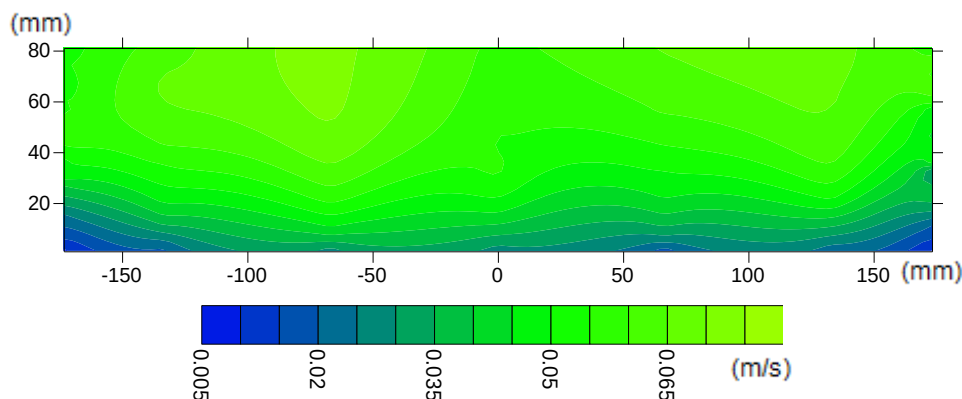


Figura 4.10 – *Contour map* para a zona de medição situada antes do início da região com hastes, $x = 5,915\text{m}$ (Z0).

Na Figura 4.10 está representado o *contour map* referente à zona de medição precedente ao início da região povoada com hastes. Foram realizados ensaios nesta zona por forma a possuir elementos para comparação do comportamento do escoamento entre, o interior da região com vegetação e a zona não afetada pela mesma.

Através da observação do esquema obtido é possível verificar que a velocidade de escoamento, na região não afetada pelas hastes, tem a configuração tipo de um escoamento turbulento, mantendo-se a velocidade aproximadamente constante ao longo da largura do canal. Contudo, os valores obtidos para a velocidade, com um valor médio de 0,0569m/s, registam-se abaixo dos valores médios obtidos para as restantes zonas consideradas (Tabela 2).

Ainda relativamente à Figura 4.10, nota-se que para a zona do escoamento com uma cota inferior a $z = 20\text{mm}$, os valores de velocidade obtidos encontram-se afectados pela rugosidade do leito do canal de onde se depreende que, tal como foi referido no subcapítulo anterior (4.2.2), o material granular que constitui o fundo rugoso não se encontra perfeitamente uniforme.

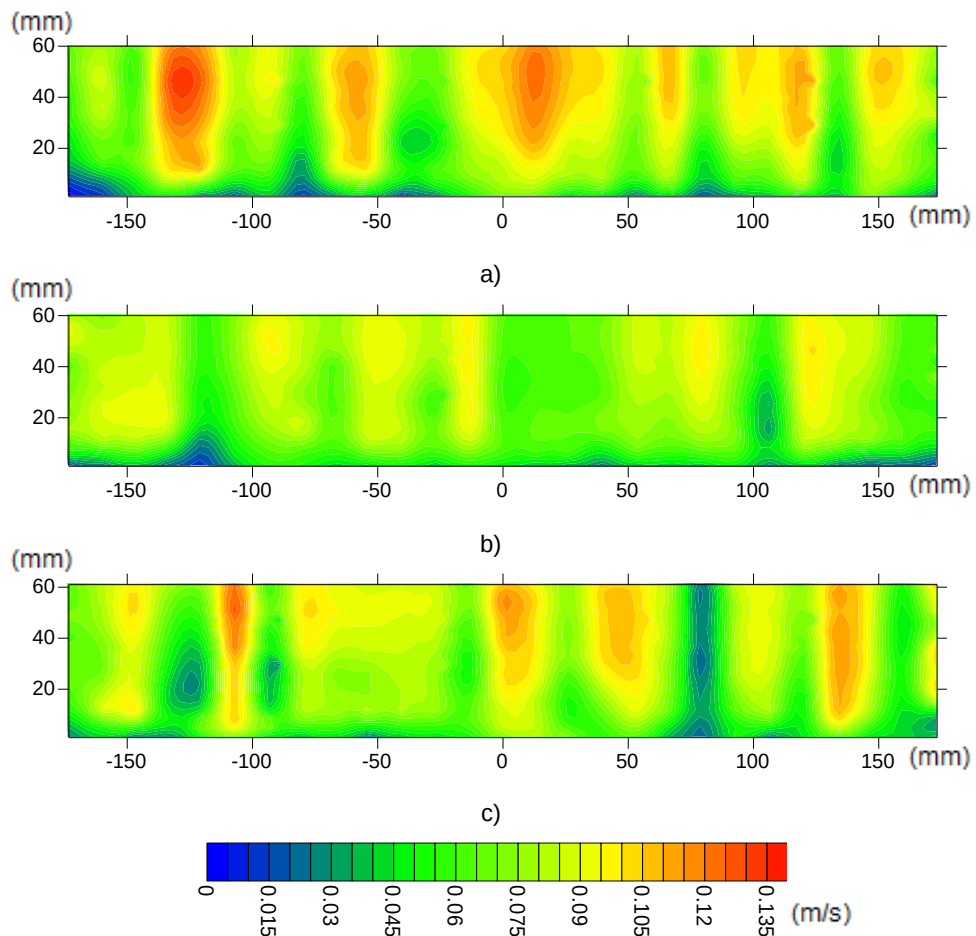


Figura 4.11 – *Contour map* para a posição: a) $x = 8,516\text{m}$ (Z1), b) $x = 8,669\text{m}$ (Z2), c) $x = 8,771\text{m}$ (Z3).

Nas zonas de medição que se situam no interior da região com hastes, a aparência dos *contour maps* apresentados (Figura 4.11, Figura 4.12) altera-se completamente.

Na Figura 4.11 estão representadas três zonas de medição ($x = 8,516\text{m}$, $x = 8,669\text{m}$ e $x = 8,771\text{m}$) e através da observação dos três diferentes esquemas é possível constatar a aleatoriedade do escoamento.

Para o *contour map* da zona de medição Z1 (Figura 4.11 a)) é possível verificar que existem posições ao longo da largura do canal onde o escoamento se faz com velocidades muito superiores à média das velocidades registadas para a respetiva zona. Esta observação vai de encontro ao afirmado no subcapítulo 4.2.1, em que se notou a criação de corredores com elevadas velocidades de escoamento no espaço entre hastes. Este facto pode ser demonstrado pelos elevados valores de velocidade obtidos para a zona que se situa entre $y = -150\text{mm}$ e $y = -100\text{mm}$. O mesmo se sucede para os valores entre $y = 100\text{mm}$ e $y = 150\text{mm}$ em $x = 8,771\text{m}$ (Figura 4.11c)).

Em sentido oposto, através da análise dos mesmos *contour maps*, é possível ter a perceção da existência de hastes imediatamente a montante da posição de medição e sua influência na velocidade de escoamento. Exemplo disso é a posição $y = 79,8\text{mm}$ em Z3, onde é visível através dos valores da velocidade, a presença de uma haste exactamente a montante. Este fenómeno torna-se mais claro em zonas com maior densidade de hastes, como a referida Z3. No entanto, na Z2 também é observável a influência da haste a montante da posição $y = 106,4\text{mm}$, devido aos reduzidos valores de velocidade obtidos.

Considerando a zona de medição com menor densidade de hastes, Figura 4.11 b), é notória uma maior uniformidade nos valores de velocidade, como está bem representado no intervalo entre $y = 0\text{mm}$ e $y = 50\text{mm}$, como já mencionado no subcapítulo 4.2.1.

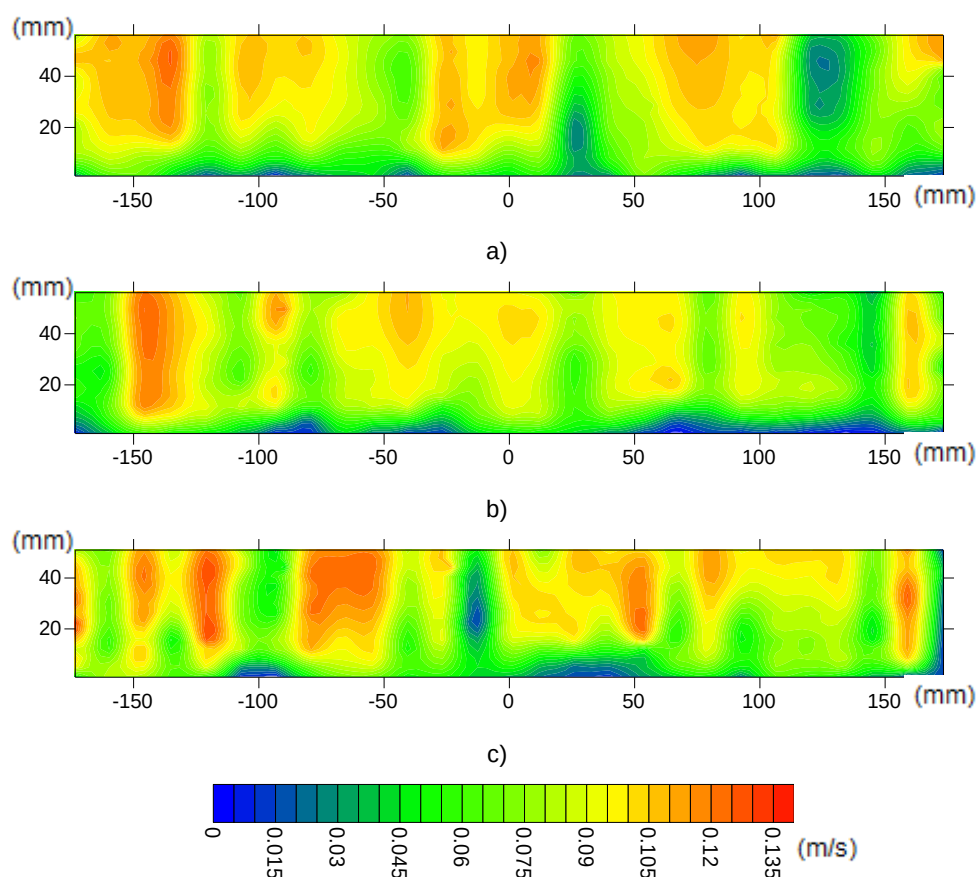


Figura 4.12 – *Contour map* para a posição: a) $x = 9,025\text{m}$ (Z4), b) $x = 9,178\text{m}$ (Z5) e c) $x = 9,280\text{m}$ (Z6).

Na figura anterior são apresentados os *contour maps* para as últimas três zonas de medição, $x = 9,025\text{mm}$, $x = 9,178\text{mm}$ e $x = 9,280\text{mm}$.

Para Z6, Figura 4.12 c), e Z4, Figura 4.12 a), zonas de medição situadas em locais com elevada densidade de hastes (Z6) ou logo após essas zonas com elevada densidade (Z4), continua-se a verificar elevadas oscilações nos valores de velocidade ao longo da largura do canal. Em Z6, para o intervalo entre $y = 150\text{mm}$ e $y = 172,9\text{mm}$ observa-se a presença de uma haste a montante da última posição de medição, $y = 172,9\text{mm}$, como pode ser corroborado pela Figura 4.3 b). Pode-se ainda compreender que a posição contígua, $y = 159,6\text{mm}$, encontra-se numa faixa entre duas hastes a montante.

Por seu turno, em Z5, comparativamente com os esquemas apresentados, as velocidades tem uma distribuição mais constante, fruto da sua localização a jusante de uma região com menor densidade de hastes.

As irregularidades do fundo rugoso do leito mencionadas, relativamente à Figura 4.10, continuam a ser observadas nas restantes zonas consideradas, embora em menor grau.

5

EFEITO DA VEGETAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Considerando a caracterização do campo de velocidades efetuada e exposta no capítulo anterior, será feita, no presente capítulo, uma análise à influência da vegetação, existente no canal, no comportamento do escoamento.

Como princípio do estudo, optou-se por avaliar de uma forma macroscópica a resistência ao escoamento por parte das hastes. Para tal, considerou-se o Teorema da Quantidade de Movimento (subcapítulo 2.4), sendo os resultados obtidos, comparados com um escoamento teórico, idealizado para o mesmo canal onde decorreram os ensaios.

5.2. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM CANAL COM VEGETAÇÃO

5.2.1. INTEGRAÇÃO DAS ZONAS DE MEDIÇÃO

De forma a o Teorema da Quantidade de Movimento ser aplicado ao caso prático abordado, considerou-se os *contour map* apresentados no subcapítulo 4.2.3, procedendo-se à integração dos mesmos de forma a se obter várias sub-superfícies de controlo, correspondendo a cada, uma determinada velocidade média e pressão.

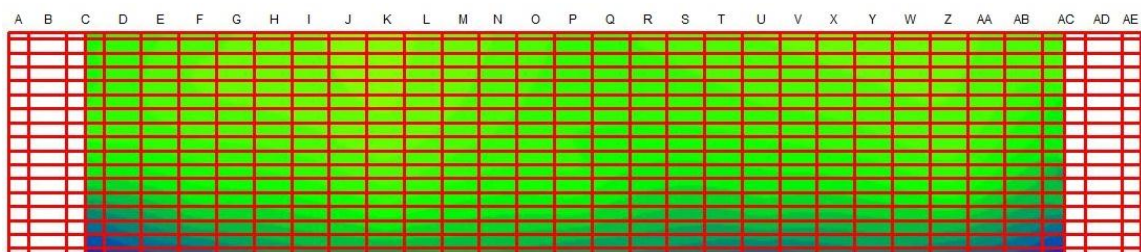
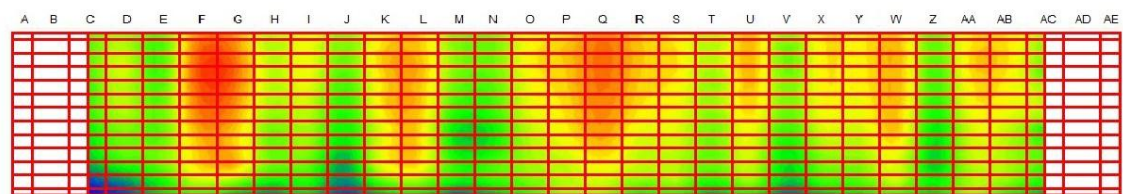


Figura 5.1 – Integração de Z_0 .



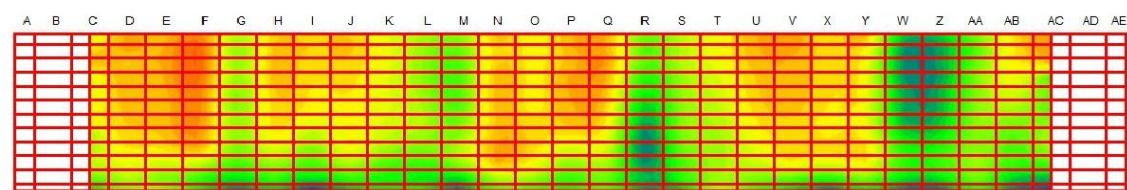
a)



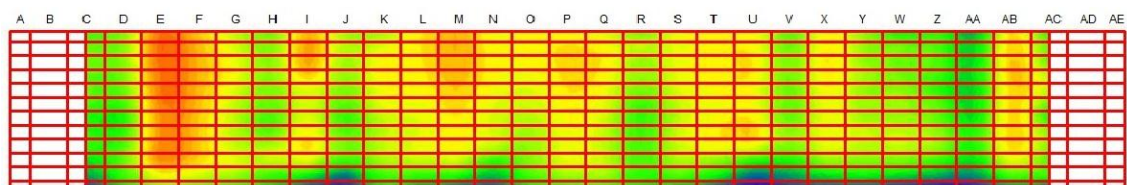
b)



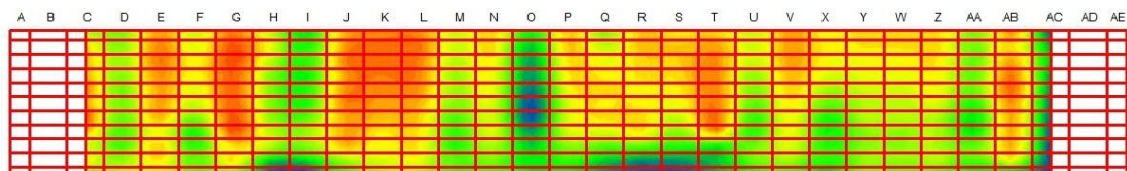
c)



d)



e)



f)

Figura 5.2 – Integração de: a) Z1, b) Z2, c) Z3, d) Z4, e) Z5 e f) Z6.

Para a definição das várias subáreas de influência foi adotada a divisão do perfil existente, em retângulos de igual largura, igual a 13,3mm, visto tratar-se da distância intervalo entre as medições

verticais realizadas. Apenas as colunas que se encontram junto às paredes (coluna A e AE na Figura 5.1 e Figura 5.2) apresentam uma largura igual a 7,15mm, na tentativa de reproduzir apenas o escoamento junto às paredes.

Devido à impossibilidade de efetuar medições ao longo de toda a largura do canal, e para que seja possível uma comparação com o modelo teórico sugerido no subcapítulo 5.3., considerou-se que as velocidades junto às paredes seriam iguais a 0 m/s. Assim por interpolação, obteve-se o valor da velocidade média para a coluna que se situa entre o último valor medido e a coluna correspondente à zona fronteira com as paredes do canal. Esta aproximação tem incorreções inerentes, visto que as velocidades não se apresentam distribuídas de forma linear, sendo obrigatório considerá-las quando realizadas as conclusões relativas ao estudo.

Relativamente à altura considerada para cada subárea de controlo, foi definida uma altura para que cada ponto de medição, demonstrado na Figura 3.34, se encontrasse no centro geométrico da área de controlo considerada. Como tal, altura dos retângulos junto ao leito apresentam uma altura de 2,5mm, os restantes tem uma altura de 5mm, com exceção para a última linha de subsecções, na fronteira da superfície livre, que dependem da altura de água verificada para a posição.

Posteriormente foram calculados, para cada subárea considerada, os dados necessários para a utilização da Equação 2.18. Considerou-se uma distribuição hidrostática das pressões para cada perfil integrado,

$$P = (h_0 - h_i).g.\rho \quad (5.1)$$

em que h_0 e h_i são altura de escoamento na zona considerada e a altura do ponto médio de cada subsecção, respectivamente. ρ equivale à massa volúmica, em que foi considerado o valor de 998 Kg/m³, para um temperatura de 20°C. Os valores correspondentes às várias subáreas adotadas são apresentados no Anexo A.

5.2.2. FORÇAS INTERVENIENTES NO ESCOAMENTO

Seguindo a aplicação da Equação 2.18, o Teorema da Quantidade de Movimento seria utilizado entre subsecções correspondentes, no entanto, esta operação implicaria inúmeras incorreções aos cálculos, pois não seriam considerados os possíveis efeitos de hastes vizinhas e a aleatoriedade do escoamento.

De forma a adaptar a Equação 2.18 à situação do caso experimental descrito, considerou-se que cada zona de medição é equivalente ao somatório das suas subsecções. Assim, a Equação 2.18 apresenta-se da seguinte forma:

$$\alpha' \rho (\sum U_i^2 S_i \vec{n}_i + \sum U_j^2 S_j \vec{n}_j) = - \sum p_i S_i \vec{n}_i - \sum p_j S_j \vec{n}_j - \vec{R} \quad (5.2)$$

Os valores para $U^2 S$ e $p S$ são apresentados no Anexo B. Para α' , coeficiente de quantidade de movimento, foi considerado o valor igual a 1 pois ambas as zonas de medição apresentam uma distribuição hidrostática de pressões.

5.2.3. FORÇA RESISTENTE AO ESCOAMENTO

A aplicação da Equação 5.2 está representada na tabela 3, com todos os termos da equação representados de forma individualizada.

Tabela 3 – Cálculo da força resistente ao escoamento.

Zona de Medição (m)	$\sum U^2 \cdot S \cdot \bar{n}$ (N)	$\sum p \cdot S \cdot \bar{n}$ (N)	R (N)	R/m (N/m)
X=5,915 (Z0)	0.0867	13.4861		
X=8,516 (Z1)	0.1542	7.5305	5.8881	2.2638
X=8,669 (Z2)	0.1220	7.7690	-0.2063	-1.3487
X=8,771 (Z3)	0.1392	7.2919	0.4598	4.5082
X=9,025 (Z4)	0.1465	5.9386	1.3461	5.2998
X=9,178 (Z5)	0.1323	5.5439	0.4089	2.6726
X=9,280 (Z6)	0.1402	4.9412	0.5948	5.8312
R_{Total}			8.4914 N	

Torna-se possível observar que, entre Z1 e Z2, o valor obtido para a força resistente ao escoamento, R, é negativo, o que indicativo que existe um ganho de quantidade de movimento entre as duas zonas. Tal acontecimento poderá ser explicado por um aumento na altura de escoamento entre as duas zonas (6,2cm para Z1 e 6,3cm para Z2). O facto de Z2 se situar imediatamente a montante de uma região com elevada densidade de hastes, pode explicar o aumento registado na altura de escoamento. No entanto, o mesmo sinal negativo obtido para R pode-se também dever a possíveis incorreções feitas na análise apresentada, visto tratar-se de um estudo grosseiro do comportamento do escoamento, devido às aproximações feitas para as velocidades junto das paredes do canal, não considerando a eventual influência que as hastes, na proximidade das posições simuladas, poderiam ter nos valores de velocidade e pressão.

Ainda na Tabela 3, é possível verificar que a resistência ao escoamento calculada, demonstra valores superiores quando obtidos entre zonas que se apresentam em regiões com maior densidade de vegetação.

5.3. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM CANAL SEM VEGETAÇÃO

Com o intuito de perceber o real impacto da vegetação na resistência ao movimento existente num escoamento, definiu-se um escoamento teórico, num canal idêntico, semelhante ao existente nos ensaios, mas sem existência de hastes.

5.3.1. PRINCÍPIO TEÓRICO PARA DEFINIÇÃO DO ESCOAMENTO

De forma a criar um escoamento teórico que possibilite elementos de comparação com os resultados obtidos no subcapítulo 5.2, foi considerado um escoamento de caudal idêntico, $Q = 2 \text{ l/s}$, num canal com as mesmas características geométricas, o mesmo leito rugoso e controlado a jusante por uma soleira idêntica.

Assim, de forma a calcular as características do escoamento teórico, nomeadamente, a altura de escoamento nos vários pontos ponderados, considerou-se que ambos os escoamentos teriam a mesma altura de escoamento imediatamente a montante da soleira. Com este raciocínio, e por se tratar de um escoamento lento, considerou-se que a montante da soleira se criava uma curva de Regolfo, tal como apresentado na Figura 5.3.

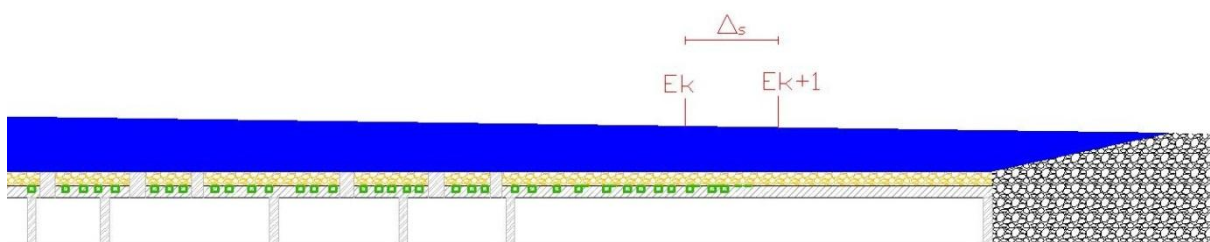


Figura 5.3 – Curva de Regolfo teórica criada a montante da soleira.

Parte-se do princípio que cada ponto do escoamento representado na figura anterior tem uma energia específica definida por,

$$E = y + \frac{Q^2}{2gS^2} \quad (5.3)$$

onde y significa a cota da zona considerada, que no caso considerado será nula, pois o canal encontra-se horizontal, estando todas as zonas à mesma cota.

Para compreender as perdas de carga entre pontos ao longo do escoamento, foi considerada a fórmula de MANNING-STRICKLER,

$$Q = K_s \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \cdot S \quad (5.4)$$

em que K_s é um coeficiente que depende da rugosidade do canal, R corresponde ao perímetro molhado e J à perda de carga unitária [J. Novais-Barbosa, 1986]. Assim, a perda de carga unitária do escoamento é obtida através de:

$$J = \left(\frac{Q}{K_s R^{2/3} S} \right)^2 \quad (5.5)$$

Utilizando a Equação 5.3 e a Equação 5.5 é possível calcular todas as alturas dos pontos da curva de Regolfo, partindo do ponto imediatamente a montante da soleira, fazendo uso da seguinte expressão:

$$\Delta_s = \frac{E_{k+1} - E_k}{\frac{J_{k+1} + J_k}{2} - i} \quad (5.6)$$

onde Δ_s , já representado na Figura 5.3, corresponde à distância entre os pontos considerados e i refere-se à inclinação existente no canal, que como já referido, é nula.

A fim de utilizar a Equação 5.5, foi necessário calcular o valor do coeficiente de rugosidade K_s . Para tal, foi calculado o seu inverso, n , através do método apresentado no livro *Open Channel Hydraulics* [Chow, 1959]:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad (5.7)$$

em que

$$K_s = \frac{1}{n} \quad (5.8)$$

onde n_0 depende do material envolvido, n_1 depende do grau de irregularidades, n_2 da variação da secção transversal do canal, n_3 do efeito de obstáculos existentes e n_4 depende da vegetação existente. O valor de m_5 é resultante do nível de sinuosidade. Os valores adotados para os vários parâmetros referidos e o valor final de K_s estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo de K_s ($m^{1/3}/s$).

Condição do Canal		Valor	n	K_s ($m^{1/3}/s$)
Material Constituinte	Gravilha fina	n_0	0.024	41.67
Grau de Irregularidade	Suave	n_1	0.000	
Variação da Secção Transversal	Gradual	n_2	0.000	
Efeito Relativo do Obstáculo	Insignificante	n_3	0.000	
Vegetação	Inexistente	n_4	0.000	
Grau de Sinuosidade	Reduzido	m_5	1.000	

5.2.3.1. Cálculo das Características do Escoamento

De forma a aplicar o Teorema da Quantidade de Movimento ao escoamento fictício, foram calculadas as alturas do escoamento nas várias zonas de medição, para, posteriormente, ser possível efetuar uma comparação com os resultados em 5.2. Todos os cálculos efetuados estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Cálculo das alturas de escoamento.

Zona de Medição	Δ_s (m)	Q (m ³ /s)	K_s (m ^{1/3} /s)	h_{k+1} (m)	h_k (m)	U (m/s)
-	0.2	0.002	41.67	0.05	0.05014	0.09972
-	0.2	0.002	41.67	0.05014	0.05029	0.09943
-	0.2	0.002	41.67	0.05029	0.05043	0.09915
-	0.2	0.002	41.67	0.05043	0.05057	0.09887
Z6	0.045	0.002	41.67	0.05057	0.05060	0.09881
Z5	0.102	0.002	41.67	0.05060	0.05068	0.09866
Z4	0.153	0.002	41.67	0.05068	0.05079	0.09845
Z3	0.254	0.002	41.67	0.05079	0.05097	0.09810
Z2	0.102	0.002	41.67	0.05097	0.05104	0.09795
Z1	0.153	0.002	41.67	0.05104	0.05116	0.09774
-	0.5	0.002	41.67	0.05116	0.05152	0.09705
-	0.5	0.002	41.67	0.05152	0.05188	0.09637
-	0.5	0.002	41.67	0.05188	0.05225	0.09569
-	0.5	0.002	41.67	0.05225	0.05262	0.09502
-	0.5	0.002	41.67	0.05262	0.05299	0.09436
Z0	0.101	0.002	41.67	0.05299	0.05336	0.09370

O método utilizado para o cálculo das várias alturas de escoamento foi um método iterativo, em que a partir do ponto conhecido (ponto imediatamente a montante da soleira) foram determinados os restantes pontos.

5.2.3.2. Força Resistente ao Movimento

Após a obtenção das características do escoamento nos diversos pontos, foram calculadas as forças que intervêm no escoamento, como apresentado na Tabela 6.

Para o cálculo da pressão correspondente a cada zona de medição, considerou-se uma distribuição hidrostática de pressões. Como neste caso não existe a necessidade de proceder a uma integração das zonas, adotou-se para o cálculo da velocidade, o valor médio para cada posição.

Tabela 6 – Cálculo da força resistente ao escoamento.

Zona de Medição (m)	$U^2 \cdot S \cdot \bar{n}$ (N)	$p \cdot S \cdot \bar{n}$ (N)	R (N)	R/m (N/m)
X=5,915 (Z0)	0.187	5.574	0.443	0.170
X=8,516 (Z1)	0.195	5.123		
X=8,669 (Z2)	0.196	5.101	0.022	0.142
X=8,771 (Z3)	0.196	5.086	0.014	0.141
X=9,025 (Z4)	0.197	5.049	0.036	0.141
X=9,178 (Z5)	0.197	5.028	0.021	0.140
X=9,280 (Z6)	0.197	5.013	0.014	0.140
R_{Total}			0.551 N	

O Teorema da Quantidade de Movimento foi aplicado entre pontos que se encontravam a metade da altura de escoamento, de forma a seguir o raciocínio aplicado em 5.2.3, em que se utilizou para fins de cálculo, os pontos a meia altura de cada subsecção.

5.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Tendo em consideração o apresentado nos últimos subcapítulos, 5.2 e 5.3, torna-se possível efetuar uma análise comparativa da resistência ao escoamento existente em dois cenários distintos, um canal com vegetação e outro sem.

Ao efetuar a comparação entre a Tabela 3e a Tabela 6, é evidente a diferente grandeza de valores obtidos para os dois cenários apresentados. Verifica-se que para o escoamento com presença de vegetação, a resistência total registada é cerca de 15 vezes maior que a calculada para o escoamento numa situação teórica sem hastes.

Ao confrontar os valores de R entre as várias zonas, nota-se que numa situação sem presença de hastes, o valor da resistência por unidade de comprimento unitária (R/m) tem um comportamento linear, enquanto para o experimento com hastes, o resultado é dependente da densidade de hastes existente, verificando-se resistências menores entre zonas com reduzida densidade de vegetação (Z4 e Z5) comparativamente com as zonas entre regiões com maior densidade (Z5 e Z6).

No entanto, todas as análises feitas terão que ter em consideração as incorreções que possam ser cometidas com esta abordagem, como já foram anteriormente referidas.

7

CONCLUSÕES

Na presente dissertação, realizou-se um trabalho laboratorial e teórico com o objetivo de caracterizar e quantificar a resistência hidráulica em regiões com presença de vegetação emersa rígida, em particular, o espaço entre-hastes. O trabalho laboratorial consistiu em medir, de forma não intrusiva, através da utilização de *Laser Doppler Anemometry*, os valores de velocidade média em diversos pontos no espaço entre-hastes. Os valores das velocidades médias foram transformados em campos de velocidades médias.

As conclusões podem ser especificadas nos seguintes pontos:

- Para um escoamento entre zonas povoadas com vegetação parece não existir uma organização característica de velocidades.
- O escoamento entre regiões com presença de vegetação é essencialmente controlado pelos elementos da vegetação.
- A altura de escoamento apresenta-se dependente da densidade de hastes existente.
- O escoamento no espaço entre-hastes apresenta grande heterogeneidade ao longo de toda a coluna de água.
- A influência relativa, do leito, no escoamento, tem maior significado para menores densidades de hastes.
- A resistência ao escoamento verifica-se superior para as regiões com maior densidade de vegetação.
- A resistência ao escoamento por parte do leito e paredes do canal é de uma ordem de grandeza muito inferior à resistência causada pela vegetação.
- Os escoamentos com maior heterogeneidade são verificados para as regiões com maior densidade de hastes.

A necessidade de dar continuidade e acrescentar conhecimento ao tema abordado nesta dissertação é evidente. Assim, na linha do presente estudo, seria recomendável:

- Avaliação das tensões existentes no espaço entre-hastes.
- Caracterizar o escoamento no plano transversal e horizontal.
- Caracterizar experimentalmente um escoamento com hastes flexíveis.

Os resultados presentes neste trabalho podem ser utilizados para posterior investigação laboratorial.

BIBLIOGRAFIA

- [1] http://www.fs.fed.us/wildflowers/regions/pacificnorthwest/MetoliusRiver/images/metolius_river_pine_lg.jpg
- [2] http://www.rexwallpapers.com/images/wallpapers/landscape/swamp/swamp_5.jpg
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- Novais-Barbosa, J. (1985). *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral Volume 1*. Porto Editora LDA, Porto
- Novais-Barbosa, J. (1986). *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral Volume 2*. Porto Editora LDA, Porto
- Pope, Stephen B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Zhang, Zh. (2010). *LDA Application Methods: Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, Berlin.
- Dehsorkhi, E. N., Afzalimehr, H., Singh, V. P. (2011) *Effect of Bed Forms and Vegetated Banks on Velocity Distributions and Turbulent Flow Structure*. Journal of Hydraulic Engineering, 12/10/2010, pp. 495-507, American Society of Civil Engineers.
- Fathi-Moghadam, M., Kashefipour, M., Ebrahimi, N., Emamgholizadeh, S. (2011). *Physical and Numerical Modeling of Submerged Roughness in Rivers and Flood Plains*. Journal of Hydrologic Engineering, 1/11/2011, pp. 858-864, American Society of Civil Engineers.
- Finningan, J. (2000). *Turbulence in Plant Canopies*. Annual Reviews Fluid Mechanics, pp. 519 – 571.
- Jarvela, J. (2004). *Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance*. Journal of Hydrology, 29/9/2004, pp. 233-241, Helsinki.
- López, F., García, M. H. (2001). *Mean Flow and turbulence Structure of Open-Channel Through Non-Emergent Vegetation*. Journal of Hydraulic Engineering, 5/5/2001, pp. 392-402, American Society of Civil Engineers.
- Nepf, H. M. (1999). *Drag, Turbulence and Diffusion in Flow Through Emergent Vegetation*. Water Resources Research, 2/1999, pp. 479-489, American Geophysical Union.
- Nepf, H. M., Vivoni, E. R. (2000). *Flow Structure in Depth-limited, Vegetated Flow*. Journal of Geophysical Research, 15/12/2000, pp. 28,547 – 28,557, American Geophysical Union.
- Nikora, V. (2007). *Spatial Averaging Concept for Rough-Bed Open Channel and Overland Flows*. Journal of Hydraulic Engineering, 8/12/2007, pp. 873-883, American Society of Civil Engineers.
- Pirim, T., Bennertt, S. J., Barkdoll, B. D. (2000). *Restoration of Degraded Stream Corridors Using Vegetation: An experimental study*. National Sedimentation Laboratory, Oxford.
- Shucksmith, J. D., Boxall, J. B., Guymer, I. (2011) *Bulk Flow Resistance in Vegetated Channels: Analysis of Momentum Balance Approaches Based on Data Obtained in Aging Live Vegetation*. Journal of Hydraulic Engineering, 1/12/2011, pp. 1624-1635, American Society of Civil Engineers.
- Stoesser, T., Kim, S. J., Diplas, P. (2010). *Turbulent Flow through Idealized Emergent Vegetation*. Journal of Hydraulic Engineering, 1/12/2010, pp. 1003-1017, American Society of Civil Engineers.

Tanino, Yukie., Nepf, Heidi M. (2009). *Laboratory Investigation of lateral dispersion within dense arrays of randomly distributed cylinders at transitional Reynolds number*. Physics of Fluids, 28/04/2009, pp. 046603-1 – 046603-10, American Institute of Physics.

White, B. L., Nepf, H. M., (2003). *Scalar Transport in Random Cylinder Arrays at Moderate Reynolds Number*. Journal of Fluid Mechanics, 21/1/2003, pp. 43-79, Cambridge University Press, Cambridge.

Wu, F., Shen, H. W., Chou, Y. (1999). *Variation of Roughness Coefficients for Unsubmerged and Submerged Vegetation*. Journal of Hydraulic Engineering, 9/1999, pp. 934-942, American Society of Civil Engineers.

Yen, B. C. (2002). *Open Channel Flow Resistance*, Journal of Hydraulic Engineering, 1/1/2002, pp. 20-39, American Society of Civil Engineers.

Jarvela, J. (2004). *Flow Resistance in Environmental Channels: Focus on vegetation*. Dissertação de Douturamento, Helsinki University of Technology.

Lory, J. (2011). *Estudo laboratorial de escoamentos em leitos com vegetação emersa rígida*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Tecnologia da Universidade da Universidade Nova de Lisboa.

Ricardo, A. (2008). *Caracterização do escoamento turbulento em canais com vegetação rígida. Aplicação ao estudo da resistência hidráulica*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico.

7

ANEXOS

Anexo A

$X = 5.915 \text{ m}$

Cotas (m)

[illegible]Pressão (N/m²)
$$P = (\text{altura da água} - \text{cota do ponto}) \times 9.81 \times 997.7735 = N/m^2$$
[illegible]Área (m²)[illegible]

Velocidade (m/s)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
1		0	0.004433	0.008866	0.012139	0.015412	0.018685	0.020341	0.021996	0.023651	0.025306	0.026961	0.027013	0.027064	0.027115	0.027167	0.027218	0.025121	0.023023	0.020926	0.018828	0.016731	0.017686	0.018641	0.019596	0.020551	0.021506	0.01756	0.013615	0.009669	0.004835	0
2		0	0.00792	0.015839	0.019338	0.022837	0.026336	0.028784	0.031232	0.03368	0.036129	0.038577	0.037633	0.036688	0.035744	0.0348	0.033856	0.03296	0.032063	0.031167	0.03027	0.029374	0.029265	0.029155	0.029046	0.028937	0.028828	0.024537	0.020246	0.015955	0.007978	0
3		0	0.010204	0.020408	0.025233	0.030058	0.034882	0.037079	0.039275	0.041478	0.043668	0.045864	0.044594	0.043415	0.042404	0.040765	0.03949	0.038695	0.037899	0.037103	0.036307	0.035512	0.035561	0.035661	0.03566	0.035709	0.035759	0.030401	0.025043	0.019685	0.009843	0
4		0	0.012771	0.025541	0.03078	0.036019	0.041258	0.044365	0.045703	0.046491	0.046887	0.050794	0.049657	0.04856	0.047404	0.046326	0.045209	0.044269	0.043329	0.042388	0.041448	0.040508	0.040952	0.041396	0.041841	0.042285	0.037273	0.038374	0.034018	0.029663	0.014831	0
5		0	0.016784	0.033569	0.037789	0.042009	0.046229	0.048231	0.050234	0.052236	0.054239	0.056241	0.054832	0.053424	0.052015	0.050606	0.049197	0.048254	0.04731	0.046367	0.045423	0.04448	0.045527	0.046575	0.047622	0.04867	0.049718	0.045371	0.041024	0.036677	0.018338	0
6		0	0.019034	0.038069	0.041885	0.045632	0.049413	0.051525	0.053637	0.055749	0.057861	0.059973	0.058522	0.057142	0.055742	0.054331	0.052921	0.051818	0.050716	0.049613	0.048511	0.047408	0.048738	0.050067	0.051397	0.052726	0.040566	0.048925	0.043795	0.038664	0.019332	0
7		0	0.024754	0.049508	0.05059	0.051671	0.052753	0.053763	0.056994	0.058515	0.060436	0.062357	0.060404	0.059531	0.058118	0.056705	0.055292	0.0541	0.052908	0.051716	0.050524	0.049332	0.050901	0.05247	0.054039	0.055608	0.057177	0.046718	0.03626	0.025802	0.012901	0
8		0	0.024123	0.048245	0.05068	0.053115	0.055549	0.057534	0.059518	0.061503	0.063488	0.065472	0.063501	0.06153	0.059559	0.057587	0.055616	0.054851	0.054085	0.05332	0.052554	0.051788	0.0535	0.055211	0.056923	0.058564	0.060346	0.055791	0.051237	0.046682	0.023441	0

9	0	0.026716	0.053432	0.055374	0.057316	0.059258	0.060834	0.06241	0.063986	0.065562	0.067138	0.064656	0.062174	0.059692	0.05721	0.054728	0.054646	0.054565	0.054483	0.054401	0.05432	0.055895	0.05747	0.059046	0.060621	0.062197	0.057589	0.052981	0.048373	0.024187	0
10	0	0.029343	0.058686	0.059573	0.060461	0.061348	0.062891	0.064434	0.065976	0.067519	0.069062	0.066239	0.063416	0.060594	0.057771	0.054948	0.055269	0.05559	0.055911	0.056232	0.056553	0.057883	0.059213	0.060543	0.061873	0.063203	0.056862	0.050521	0.044181	0.02209	0
11	0	0.029602	0.059204	0.060456	0.061708	0.06296	0.064312	0.065665	0.067017	0.068369	0.069721	0.066969	0.064217	0.061465	0.058713	0.055961	0.056334	0.056707	0.057081	0.057454	0.057827	0.059083	0.060339	0.061595	0.062851	0.064107	0.058311	0.052514	0.046718	0.023359	0
12	0	0.02631	0.05262	0.056424	0.060229	0.064033	0.065364	0.066696	0.068027	0.069359	0.07069	0.067954	0.065218	0.062482	0.059746	0.05701	0.05776	0.05851	0.05926	0.06001	0.06076	0.061551	0.062342	0.063133	0.063923	0.064714	0.058	0.051285	0.044571	0.022285	0
13	0	0.027619	0.055238	0.058538	0.061838	0.065138	0.066234	0.067331	0.068428	0.069524	0.070621	0.067939	0.065256	0.062574	0.059891	0.057209	0.0581	0.058992	0.059883	0.060775	0.061666	0.062422	0.063177	0.063932	0.064687	0.065442	0.064068	0.062695	0.061321	0.03066	0
14	0	0.025517	0.051033	0.055905	0.060776	0.065647	0.066684	0.067722	0.068759	0.069796	0.070834	0.06823	0.065627	0.063023	0.06042	0.057817	0.058719	0.059621	0.060524	0.061426	0.062328	0.06295	0.063572	0.064193	0.064815	0.065436	0.064199	0.062963	0.061726	0.030863	0
15	0	0.027128	0.054256	0.057775	0.061294	0.064812	0.065998	0.067183	0.068368	0.069553	0.070739	0.068346	0.065954	0.063562	0.06117	0.058778	0.059706	0.060634	0.061562	0.06249	0.063418	0.063912	0.064406	0.064901	0.065395	0.06589	0.063724	0.061559	0.059393	0.029697	0
16	0	0.02751	0.055021	0.057897	0.060773	0.063649	0.065041	0.066432	0.067824	0.069216	0.070607	0.068092	0.065576	0.06306	0.060544	0.058028	0.059331	0.060633	0.061936	0.063239	0.064541	0.06486	0.065178	0.065496	0.065814	0.066133	0.064998	0.063863	0.062728	0.031364	0
17	0	0.025594	0.051188	0.054251	0.057314	0.060377	0.062523	0.064669	0.066814	0.06896	0.071106	0.068555	0.066004	0.063452	0.060901	0.05835	0.059752	0.061154	0.062556	0.063958	0.065361	0.06559	0.06582	0.06605	0.06628	0.066509	0.062727	0.058945	0.055163	0.027581	0

$$X=8.516\text{m}$$

Cotas (m)

[illegible]Pressão (N/m²)
$$P = (\text{altura da água} - \text{cota do ponto}) \times 9.81 \times 997.7735 = \text{N/m}^2$$
[illegible]Area (m²)[illegible]

Velocidade (m/s)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
1		0	0.000995	0.001991	0.011937	0.041077	0.048962	0.025648	0.019791	0.040794	0.011472	0.028442	0.037962	0.013111	0.025566	0.050589	0.070645	0.067933	0.040384	0.046018	0.024046	0.041844	0.015788	0.02929	0.037639	0.047099	0.033461	0.076693	0.044992	0.021809	0.010904	0
2		0	0.00572	0.011441	0.024281	0.045814	0.084381	0.072925	0.045202	0.054052	0.025615	0.060957	0.074788	0.048922	0.056994	0.06889	0.083336	0.088555	0.072953	0.081193	0.051645	0.0795	0.037573	0.061948	0.063656	0.091203	0.050702	0.081624	0.07478	0.057356	0.028678	0
3		0	0.014241	0.028482	0.048172	0.062669	0.100763	0.109391	0.066587	0.066171	0.028858	0.091236	0.100356	0.059053	0.065117	0.077391	0.081967	0.09405	0.083935	0.08228	0.064879	0.086149	0.041927	0.068926	0.068055	0.090991	0.03721	0.080258	0.07987	0.057983	0.028991	0
4		0	0.020276	0.040552	0.069231	0.072369	0.10386	0.11863	0.068912	0.072712	0.030943	0.094164	0.105044	0.048923	0.053135	0.078338	0.082666	0.02612	0.083347	0.082729	0.065213	0.089579	0.041932	0.074672	0.074904	0.039413	0.083811	0.086516	0.078126	0.059656	0.032983	0
5		0	0.021076	0.042153	0.068182	0.061744	0.105797	0.102995	0.065146	0.078491	0.046835	0.089636	0.105241	0.041334	0.045234	0.080119	0.092681	0.081123	0.086538	0.089331	0.068536	0.09268	0.049513	0.084484	0.08142	0.102425	0.040792	0.088295	0.081031	0.058198	0.029099	0
6		0	0.02369	0.04738	0.073121	0.06245	0.112579	0.108309	0.069519	0.081374	0.074787	0.089656	0.105152	0.046168	0.047878	0.083003	0.098116	0.115099	0.09354	0.091491	0.0673	0.096265	0.058702	0.091285	0.087326	0.10964	0.044983	0.082824	0.085885	0.050661	0.025031	0
7		0	0.028229	0.056459	0.082554	0.068443	0.120191	0.115278	0.076122	0.084475	0.052176	0.097124	0.108106	0.05386	0.057174	0.08995	0.100182	0.118144	0.098278	0.094596	0.072718	0.103858	0.065262	0.095698	0.090851	0.106273	0.050107	0.093569	0.092464	0.087019	0.04351	0
8		0	0.027535	0.055071	0.086953	0.06116	0.12195	0.118537	0.080912	0.088515	0.054856	0.102949	0.109768	0.063369	0.060024	0.091234	0.10114	0.119834	0.101694	0.096513	0.076143	0.107045	0.069263	0.097244	0.092479	0.111445	0.054705	0.098426	0.09611	0.081775	0.040887	0
9		0	0.027745	0.05549	0.083612	0.06067	0.125338	0.122575	0.083323	0.09267	0.057966	0.098656	0.107397	0.067618	0.062467	0.092393	0.103892	0.122306	0.104117	0.097805	0.071842	0.108634	0.069864	0.099114	0.095355	0.110888	0.059562	0.098566	0.096201	0.082304	0.041152	0
10		0	0.030347	0.060693	0.091415	0.050656	0.13007	0.126767	0.082431	0.096008	0.062315	0.103153	0.111357	0.072591	0.067391	0.095356	0.103593	0.123176	0.104895	0.100574	0.077743	0.110444	0.066153	0.099212	0.095085	0.109681	0.057733	0.102838	0.099983	0.058191	0.029095	0
11		0	0.031739	0.063477	0.087504	0.057772	0.12437	0.122964	0.083576	0.094346	0.067067	0.107281	0.108881	0.075691	0.068263	0.097223	0.105809	0.123946	0.10633	0.101524	0.081099	0.110773	0.066221	0.100654	0.096277	0.111322	0.067535	0.104084	0.101806	0.07845	0.039225	0
12		0	0.030779	0.061558	0.082639	0.057878	0.121562	0.117395	0.078434	0.095041	0.067978	0.09988	0.106511	0.071582	0.065613	0.096327	0.10561	0.122721	0.105527	0.10032	0.077537	0.110806	0.066587	0.100356	0.097207	0.110172	0.063576	0.099939	0.100465	0.070691	0.035345	0
13		0	0.034103	0.068205	0.079067	0.065132	0.124574	0.113859	0.079508	0.096559	0.069475	0.095675	0.107357	0.072983	0.070742	0.092891	0.099238	0.117784	0.105433	0.097086	0.079501	0.111093	0.070851	0.10099	0.09873	0.110411	0.06377	0.100721	0.099379	0.082691	0.041813	0

$$X=8.669\text{m}$$

Cotas (m)

[illegible]Pressão (N/m²)
$$P = (\text{altura da água} - \text{cota do ponto}) \times 9.81 \times 997.7735 = \text{N/m}^2$$
[illegible]Area (m²)[illegible]

Velocidade (m/s)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
1	0	0.005361	0.010722	0.02426	0.03772	0.020185	0.011183	0.035803	0.056601	0.054906	0.041482	0.041761	0.04979	0.039185	0.051732	0.044857	0.038352	0.035344	0.02585	0.03937	0.040274	0.040413	0.049024	0.028009	0.039215	0.024938	0.016876	0.019052	0.011516	0.005758	0	
2	0	0.029372	0.058744	0.056373	0.064047	0.049754	0.01895	0.049221	0.062912	0.060263	0.058038	0.072719	0.072474	0.061967	0.07352	0.06346	0.063199	0.064594	0.047158	0.067573	0.060777	0.064201	0.065469	0.048469	0.073156	0.061761	0.049365	0.0508	0.037338	0.018669	0	
3	0	0.03247	0.064941	0.083786	0.085328	0.072458	0.027267	0.053483	0.070565	0.076319	0.046414	0.034282	0.083137	0.067171	0.087579	0.076378	0.065239	0.064267	0.060817	0.075113	0.068465	0.077282	0.070802	0.036262	0.084092	0.080702	0.07884	0.06525	0.055137	0.027569	0	
4	0	0.042271	0.084543	0.08748	0.08955	0.08934	0.043556	0.07458	0.089359	0.065279	0.083931	0.049091	0.068851	0.094989	0.062647	0.06596	0.065815	0.073097	0.077294	0.07212	0.083202	0.07176	0.082336	0.061787	0.085089	0.078146	0.064292	0.061379	0.03069	0		
5	0	0.033852	0.067704	0.089894	0.09127	0.091942	0.050302	0.062697	0.083774	0.082877	0.062384	0.08802	0.082622	0.060855	0.079575	0.061503	0.065092	0.064915	0.071312	0.078566	0.074905	0.087645	0.067877	0.036701	0.090294	0.087309	0.075133	0.062225	0.057773	0.028887	0	
6	0	0.037658	0.075316	0.089839	0.090529	0.088374	0.048166	0.064251	0.084982	0.075325	0.063502	0.086927	0.080773	0.058392	0.096867	0.059605	0.063821	0.063179	0.065112	0.08053	0.077447	0.091469	0.068521	0.032842	0.093654	0.087081	0.074084	0.057298	0.059693	0.029847	0	
7	0	0.034914	0.096827	0.081933	0.090442	0.08882	0.049629	0.066968	0.087617	0.075106	0.064099	0.087892	0.082623	0.065062	0.092771	0.05789	0.061232	0.061733	0.064573	0.082661	0.079542	0.093987	0.069971	0.040085	0.093029	0.088045	0.076831	0.057574	0.061248	0.030624	0	
8	0	0.034832	0.069663	0.088427	0.088099	0.086034	0.053964	0.069923	0.089215	0.080644	0.064428	0.090116	0.087378	0.07196	0.092776	0.060188	0.060699	0.060793	0.065575	0.083963	0.082596	0.096071	0.071462	0.054917	0.096144	0.089131	0.081008	0.060825	0.076041	0.038072	0	
9	0	0.031047	0.062093	0.084065	0.086945	0.087185	0.055617	0.073528	0.093831	0.085151	0.060613	0.092289	0.090249	0.076318	0.098442	0.060888	0.062022	0.061417	0.067295	0.085937	0.083401	0.09776	0.076006	0.050754	0.095163	0.089783	0.084003	0.061074	0.050784	0.025392	0	
10	0	0.040986	0.081972	0.082204	0.083762	0.088666	0.057163	0.073485	0.094808	0.084375	0.076109	0.093342	0.090329	0.082529	0.097226	0.063529	0.046474	0.048484	0.06978	0.08653	0.0841	0.098288	0.077884	0.055176	0.095759	0.092046	0.087061	0.063143	0.071696	0.035848	0	
11	0	0.045928	0.081962	0.083401	0.083742	0.087097	0.055748	0.074439	0.098517	0.084621	0.076785	0.093963	0.091508	0.083968	0.097256	0.063198	0.064248	0.064468	0.070676	0.086041	0.08371	0.098363	0.074924	0.056326	0.092406	0.091498	0.087689	0.064676	0.056216	0.028108	0	
12	0	0.046904	0.093808	0.076227	0.083093	0.085597	0.057278	0.074539	0.095161	0.086051	0.077873	0.091294	0.089426	0.081821	0.09873	0.064987	0.063579	0.064696	0.069862	0.068812	0.08396	0.09664	0.078088	0.05891	0.09579	0.090869	0.087175	0.063079	0.066641	0.033321	0	
13	0	0.037388	0.074775	0.072245	0.084923	0.086941	0.055971	0.072091	0.093125	0.083246	0.075451	0.09161	0.08727	0.080921	0.098005	0.065116	0.062469	0.065287	0.068615	0.086428	0.083773	0.09595	0.077073	0.05767	0.094327	0.088256	0.086771	0.066195	0.060492	0.030246	0	

$$X=8.771\text{m}$$

Cotas (m)

[illegible]Pressão (N/m²)
$$P = (\text{altura da água} - \text{cota do ponto}) \times 9.81 \times 997.7735 = \text{N/m}^2$$
[illegible]Area (m²)[illegible]

Velocidade (m/s)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
1	0	0.013239	0.026479	0.042723	0.024044	0.025718	0.05142	0.070566	0.043921	0.034563	0.044896	0.022285	0.040743	0.043561	0.05079	0.072905	0.082032	0.073275	0.056478	0.063368	0.034555	0.021833	0.051971	0.02614	0.045279	0.062459	0.043817	0.045311	0.043116	0.021558	0	
2	0	0.018477	0.036954	0.056552	0.070201	0.05185	0.075245	0.108508	0.079716	0.068478	0.064252	0.058713	0.062305	0.062549	0.064863	0.090823	0.085474	0.055395	0.060603	0.079978	0.050015	0.024193	0.049808	0.059973	0.064448	0.099555	0.064749	0.040775	0.023552	0.011776	0	
3	0	0.026732	0.053464	0.090518	0.105647	0.046666	0.046681	0.103115	0.045269	0.081162	0.081006	0.084458	0.081478	0.07777	0.06339	0.086328	0.084515	0.053424	0.068194	0.09245	0.071011	0.033132	0.066248	0.081645	0.048836	0.110518	0.081204	0.043812	0.049169	0.024584	0	
4	0	0.030057	0.060113	0.084762	0.094437	0.038747	0.033369	0.063111	0.033735	0.081789	0.076001	0.073378	0.079475	0.077792	0.061303	0.094294	0.082903	0.052703	0.077068	0.095406	0.069425	0.026973	0.068896	0.080842	0.048729	0.11014	0.084237	0.038572	0.096301	0.048515	0	
5	0	0.032247	0.064495	0.075914	0.089335	0.041642	0.030936	0.107966	0.03779	0.08062	0.075358	0.074624	0.080294	0.077311	0.052146	0.098147	0.091359	0.057488	0.085423	0.098285	0.073474	0.026874	0.075478	0.083713	0.055511	0.111944	0.085927	0.049553	0.056583	0.053292	0	
6	0	0.033031	0.066063	0.068548	0.090509	0.046931	0.03285	0.105371	0.029378	0.079845	0.072135	0.073856	0.081565	0.06779	0.051862	0.101955	0.068674	0.093941	0.102594	0.072147	0.021271	0.081082	0.088155	0.059415	0.113915	0.092027	0.051587	0.09516	0.047578	0		
7	0	0.034862	0.069725	0.06837	0.090109	0.051904	0.036729	0.109553	0.067625	0.087268	0.077777	0.080536	0.083312	0.076328	0.0491	0.096866	0.091773	0.073443	0.101453	0.104097	0.074828	0.018459	0.080153	0.098934	0.064094	0.114089	0.092725	0.049104	0.105621	0.052811	0	
8	0	0.033686	0.067379	0.070332	0.091409	0.054841	0.043069	0.102657	0.036321	0.079734	0.087387	0.087875	0.086607	0.081536	0.05303	0.105497	0.099144	0.073368	0.102643	0.104228	0.077083	0.021206	0.081692	0.098564	0.065804	0.114505	0.092179	0.043963	0.104304	0.052152	0	
9	0	0.029292	0.058584	0.073256	0.096037	0.06005	0.051168	0.120434	0.046855	0.094375	0.087076	0.087929	0.087164	0.08563	0.060626	0.110194	0.099636	0.070797	0.102688	0.104335	0.079732	0.025446	0.083237	0.092053	0.068339	0.115493	0.092773	0.04614	0.082753	0.041376	0	
10	0	0.035701	0.071403	0.079095	0.100775	0.063427	0.055712	0.120841	0.062305	0.096326	0.093054	0.090839	0.088833	0.085575	0.059845	0.107971	0.099188	0.072811	0.103651	0.10464	0.080083	0.024803	0.081062	0.09103	0.071988	0.114154	0.093323	0.043418	0.073486	0.036743	0	
11	0	0.034509	0.069018	0.078515	0.102052	0.069057	0.063223	0.129551	0.071769	0.10207	0.096919	0.090499	0.090988	0.088804	0.06676	0.115733	0.101424	0.075725	0.103271	0.104004	0.080177	0.023599	0.07889	0.088742	0.072151	0.104861	0.093748	0.047812	0.037486	0.064983	0	
12	0	0.033051	0.062101	0.082422	0.103407	0.072293	0.064965	0.124782	0.059892	0.096961	0.0913	0.090259	0.091562	0.09024	0.072362	0.11922	0.104023	0.07658	0.105874	0.104994	0.080391	0.020049	0.081818	0.093396	0.077022	0.117179	0.09402	0.04903	0.092424	0.046212	0	
13	0	0.034314	0.066868	0.082385	0.095965	0.080363	0.074767	0.121924	0.05834	0.098928	0.092496	0.087463	0.088465	0.086063	0.065389	0.104835	0.093527	0.074834	0.102729	0.101809	0.081756	0.022656	0.087756	0.091205	0.070909	0.110189	0.095332	0.051494	0.108584	0.054292	0	

$$X=9.025\text{m}$$

Cotas (m)

[illegible]Pressão (N/m²)
$$P = (\text{altura da água} - \text{cota do ponto}) \times 9.81 \times 997.7735 = N/m^2$$
[illegible]Area (m²)[illegible]

Velocidade (m/s)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
1	0	0.015703	0.031405	0.064298	0.070304	0.041059	0.017819	0.033133	0.007571	0.027566	0.041104	0.046166	0.016845	0.053136	0.047535	0.043049	0.055474	0.026506	0.030668	0.075196	0.04979	0.032058	0.013824	0.035284	0.018647	0.014911	0.04518	0.021417	0.013856	0.066928	0
2	0	0.03534	0.070681	0.083988	0.071971	0.059881	0.048294	0.062047	0.048477	0.062069	0.051918	0.047953	0.044269	0.083107	0.081443	0.059617	0.071228	0.037168	0.058567	0.080736	0.078423	0.069142	0.057803	0.075852	0.048358	0.048717	0.075649	0.041738	0.03812	0.01906	0
3	0	0.041902	0.083804	0.092145	0.087184	0.087893	0.066706	0.079243	0.060965	0.063017	0.060708	0.06115	0.11103	0.09727	0.074973	0.080079	0.026217	0.060749	0.077732	0.080625	0.010626	0.095861	0.059952	0.058442	0.059262	0.076924	0.050766	0.066723	0.033361	0.01366	0
4	0	0.039309	0.078618	0.100054	0.100821	0.111297	0.070854	0.091969	0.072014	0.096961	0.080039	0.071223	0.081668	0.112299	0.101839	0.088289	0.090692	0.022912	0.067929	0.077324	0.091284	0.105576	0.100802	0.103623	0.054612	0.054422	0.075917	0.060277	0.077468	0.038734	0
5	0	0.038695	0.077339	0.103513	0.105114	0.116052	0.072541	0.099176	0.081773	0.095848	0.08682	0.087065	0.075181	0.108082	0.102307	0.100212	0.094956	0.024751	0.072184	0.082427	0.094848	0.102404	0.098163	0.095772	0.043437	0.044315	0.071894	0.043688	0.079461	0.03973	0
6	0	0.049236	0.098472	0.105945	0.106337	0.117307	0.073291	0.104867	0.093674	0.095281	0.08965	0.087155	0.067017	0.106477	0.100678	0.108401	0.100579	0.033216	0.073465	0.081491	0.10067	0.10425	0.096393	0.093578	0.036733	0.037718	0.075135	0.072523	0.06986	0.03493	0
7	0	0.046471	0.092942	0.106627	0.106205	0.11179	0.071777	0.102682	0.098441	0.0981	0.092157	0.079798	0.062696	0.109026	0.095642	0.110547	0.10522	0.040974	0.074298	0.084659	0.10259	0.074756	0.100114	0.096514	0.034557	0.035637	0.07485	0.082497	0.064597	0.032299	0
8	0	0.043399	0.086798	0.108436	0.107885	0.119389	0.071426	0.100828	0.092005	0.07667	0.061254	0.109469	0.096408	0.110603	0.107333	0.049191	0.076005	0.086214	0.10416	0.108314	0.099261	0.096007	0.034009	0.034057	0.047367	0.070367	0.094066	0.065967	0.034784	0	
9	0	0.04425	0.0885	0.110424	0.108861	0.123654	0.077711	0.109333	0.100537	0.101636	0.091489	0.075233	0.060557	0.108979	0.097408	0.111799	0.110521	0.054284	0.076641	0.089426	0.105333	0.109313	0.101654	0.09667	0.030031	0.030805	0.073513	0.095735	0.060508	0.030254	0
10	0	0.056082	0.112164	0.120820	0.110584	0.125338	0.074586	0.108634	0.10104	0.104769	0.094045	0.074534	0.06203	0.104337	0.097602	0.106241	0.115453	0.082473	0.082925	0.093354	0.108012	0.108692	0.101829	0.097259	0.028389	0.033057	0.067255	0.098772	0.112967	0.056484	0
11	0	0.049301	0.098602	0.113732	0.108871	0.125681	0.074033	0.106013	0.104983	0.107008	0.093081	0.076575	0.066851	0.103702	0.09657	0.10865	0.108953	0.062412	0.081179	0.095073	0.109015	0.112679	0.101535	0.099608	0.030693	0.031653	0.061998	0.099731	0.113536	0.056768	0
12	0	0.03923	0.07846	0.09829	0.106668	0.11635	0.081473	0.103971	0.102523	0.104845	0.09058	0.080611	0.072582	0.108815	0.09552	0.108957	0.111258	0.06898	0.08362	0.094307	0.101193	0.114447	0.097989	0.113752	0.041193	0.042303	0.072619	0.10096	0.11412	0.05706	0

$$X=9.178\text{m}$$

Cotas (m)

[illegible]Pressão (N/m²)
$$P = (\text{altura da água} - \text{cota do ponto}) \times 9.81 \times 997.7735 = \text{N/m}^2$$
[illegible]Area (m²)[illegible]

Velocidade (m/s)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
1	0	0.003845	0.00769	0.038077	0.059623	0.1051967	0.047913	0.036961	0.011338	0.009925	0.046119	0.025343	0.015114	0.014154	0.042068	0.045301	0.047009	0.043806	0.028874	0.015208	0.001431	0.015852	0.012342	0.012221	0.009599	0.001282	0.006132	0.019544	0.007463	0.003731	0	
2	0	0.017091	0.034181	0.058026	0.096141	0.091285	0.081414	0.058379	0.049048	0.018516	0.05876	0.057596	0.056313	0.036627	0.064076	0.08164	0.083896	0.057254	0.065992	0.052294	0.020672	0.030733	0.044424	0.050755	0.044433	0.035326	0.029133	0.065509	0.064316	0.032158	0	
3	0	0.027001	0.041402	0.065131	0.11915	0.104556	0.092535	0.086981	0.093598	0.0614	0.080896	0.086584	0.089892	0.053373	0.072544	0.091942	0.085756	0.059623	0.081326	0.071832	0.053052	0.050243	0.076398	0.073221	0.070708	0.058141	0.044108	0.091457	0.061099	0.030505	0	
4	0	0.031022	0.060244	0.060219	0.11823	0.10747	0.085065	0.081647	0.105201	0.070906	0.084818	0.091056	0.097489	0.089267	0.07422	0.092705	0.083109	0.059262	0.086433	0.097183	0.096889	0.072075	0.093722	0.081417	0.085893	0.079904	0.051361	0.106801	0.071535	0.035767	0	
5	0	0.028554	0.057108	0.052869	0.116276	0.105777	0.081439	0.060686	0.099731	0.060626	0.082215	0.088822	0.097991	0.087678	0.077716	0.09484	0.084159	0.057296	0.087358	0.099054	0.076224	0.073872	0.095618	0.087339	0.086411	0.076644	0.054835	0.107482	0.045862	0.037939	0	
6	0	0.025222	0.050444	0.048299	0.116895	0.106175	0.087025	0.060905	0.090566	0.055715	0.085193	0.090336	0.100271	0.088543	0.082631	0.096222	0.08812	0.059499	0.084363	0.094281	0.098723	0.06348	0.093783	0.076745	0.075025	0.094694	0.059633	0.10499	0.047592	0.027296	0	
7	0	0.032309	0.064619	0.057612	0.119201	0.109154	0.084946	0.065775	0.089993	0.062354	0.093202	0.091679	0.102757	0.089691	0.085796	0.096892	0.091665	0.056212	0.085138	0.092772	0.095639	0.065611	0.094634	0.076431	0.078514	0.068132	0.044281	0.106451	0.063547	0.031773	0	
8	0	0.034169	0.068338	0.065938	0.122292	0.109269	0.091732	0.071006	0.090654	0.071302	0.09516	0.099519	0.105754	0.094674	0.089522	0.100996	0.094166	0.071587	0.090862	0.095549	0.095449	0.06606	0.097348	0.074526	0.074812	0.052898	0.038563	0.104897	0.087071	0.034536	0	
9	0	0.032284	0.064568	0.067304	0.121239	0.109797	0.095981	0.073212	0.108804	0.074416	0.098	0.097905	0.108537	0.096611	0.093932	0.101138	0.098017	0.075017	0.092563	0.09709	0.100402	0.068161	0.099687	0.080657	0.069508	0.062057	0.046567	0.108936	0.081069	0.040534	0	
10	0	0.035727	0.071453	0.070319	0.124412	0.109387	0.093465	0.073687	0.11482	0.076999	0.098795	0.098817	0.109994	0.097074	0.096278	0.101753	0.099323	0.073088	0.0991	0.096121	0.101203	0.096688	0.101921	0.074591	0.076416	0.063572	0.039817	0.107685	0.081069	0.009031	0	
11	0	0.032394	0.066798	0.07152	0.124953	0.10954	0.090487	0.070641	0.11449	0.081355	0.090491	0.099159	0.110538	0.095919	0.095841	0.101292	0.09748	0.088951	0.092788	0.094299	0.097724	0.066633	0.100427	0.07697	0.073161	0.065522	0.040336	0.107718	0.071646	0.035373	0	
12	0	0.029774	0.059548	0.069311	0.121111	0.106034	0.084616	0.066866	0.110276	0.077709	0.075072	0.098579	0.110507	0.094081	0.096735	0.094621	0.088662	0.064095	0.094733	0.097258	0.097778	0.063032	0.098939	0.075137	0.044521	0.056022	0.030393	0.104304	0.055328	0.027664	0	

$$X=9.280\text{m}$$

Cotas (m)

[illegible]Pressão (N/m²)
$$P = (\text{altura da água} - \text{cota do ponto}) \times 9.81 \times 997.7735 = \text{N/m}^2$$

508.9842 0.017982

9.152351

[illegible]Area (m²)[illegible]

Velocidade (m/s)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
1	0	0.025803	0.051605	0.083957	0.082089	0.060907	0.056993	0.012495	0.004653	0.049758	0.070486	0.069704	0.051035	0.055734	0.042163	0.037822	0.024434	0.01845	0.012247	0.031705	0.041254	0.050741	0.026411	0.064652	0.05648	0.04814	0.033306	0.007901	0.014544	0.007272	0
2	0	0.056779	0.113559	0.07687	0.102733	0.064805	0.109112	0.03685	0.042384	0.074681	0.088901	0.095696	0.067653	0.073769	0.046337	0.060554	0.038212	0.023426	0.028965	0.039936	0.071467	0.079716	0.05733	0.079249	0.076684	0.088589	0.06241	0.102217	0.015639	0.007819	0
3	0	0.043235	0.086469	0.05799	0.113312	0.053532	0.0971	0.086512	0.073779	0.111275	0.093491	0.100895	0.050786	0.080698	0.03802	0.07252	0.059909	0.06343	0.053203	0.034439	0.069585	0.092846	0.053086	0.074175	0.0737	0.07924	0.069897	0.112382	0.014061	0.00703	0
4	0	0.056085	0.112169	0.056345	0.090956	0.042341	0.13491	0.082837	0.07739	0.112255	0.096409	0.100896	0.054844	0.09502	0.030328	0.090017	0.089781	0.103841	0.071859	0.125529	0.049417	0.09561	0.046048	0.069947	0.070963	0.079922	0.03983	0.114094	0.018422	0.009211	0
5	0	0.071349	0.142698	0.064763	0.114779	0.067846	0.038083	0.073444	0.064701	0.091959	0.107003	0.107086	0.060016	0.091849	0.011079	0.091673	0.010166	0.102488	0.081962	0.124572	0.055479	0.096531	0.049429	0.086022	0.086575	0.004813	0.094074	0.015472	0.019554	0.009777	0
6	0	0.054152	0.108303	0.067338	0.115169	0.087334	0.126254	0.071164	0.049624	0.12157	0.110922	0.111384	0.076032	0.091384	0.12175	0.086375	0.097049	0.027481	0.0914	0.123362	0.060766	0.101803	0.065049	0.080795	0.080893	0.090074	0.050216	0.118607	0.023102	0.011551	0
7	0	0.065691	0.131382	0.063793	0.112265	0.088416	0.127185	0.071903	0.056375	0.116946	0.115816	0.117182	0.077465	0.097764	0.021003	0.095163	0.104369	0.098088	0.098065	0.117741	0.069472	0.106535	0.07769	0.087701	0.088242	0.095642	0.068695	0.130335	0.025298	0.012649	0
8	0	0.055988	0.111976	0.072471	0.118285	0.09311	0.126623	0.072851	0.044211	0.111003	0.11935	0.119624	0.075112	0.0975	0.027195	0.100066	0.096866	0.100981	0.101263	0.12132	0.072622	0.109364	0.090336	0.092166	0.093455	0.09864	0.062867	0.124681	0.028105	0.014052	0
9	0	0.056033	0.112066	0.073193	0.123752	0.094301	0.131843	0.084118	0.057469	0.121924	0.12287	0.120432	0.080243	0.089904	0.027658	0.031318	0.089803	0.102621	0.104066	0.116759	0.084767	0.115318	0.094689	0.095215	0.09455	0.100937	0.066168	0.114084	0.039879	0.019939	0
10	0	0.054301	0.108602	0.072649	0.118671	0.087878	0.129622	0.095653	0.051117	0.113975	0.121758	0.124504	0.08796	0.105373	0.037062	0.109147	0.083128	0.101157	0.106489	0.114218	0.084588	0.114037	0.097586	0.101271	0.011789	0.012693	0.069201	0.102511	0.033327	0.016664	0
11	0	0.03942	0.07884	0.066778	0.115729	0.082117	0.120493	0.082218	0.040167	0.11113	0.116533	0.124608	0.018885	0.107723	0.04748	0.07423	0.06710	0.106715	0.09546	0.101724	0.081752	0.115716	0.091915	0.105619	0.099936	0.101469	0.066389	0.121209	0.015579	0.00779	0

Anexo B

$X = 5.915 \text{ m}$ $X = 8.516 \text{ m}$
$$X=8.669\text{m}$$
 $X = 8.771 \text{ m}$ [illegible]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
1	0.013717	0.012758	0.012758	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516	0.025516
2	0.017846	0.016598	0.016598	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197	0.033197
3	0.016097	0.014971	0.014971	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942	0.029942
4	0.013437	0.013344	0.013344	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687	0.026687
5	0.012597	0.011716	0.011716	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433	0.023433
6	0.010848	0.010089	0.010089	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178	0.020178
7	0.009098	0.008462	0.008462	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924	0.016924
8	0.007348	0.006835	0.006835	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669	0.013669
9	0.005599	0.005207	0.005207	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415	0.010415
10	0.003849	0.00358	0.00358	0.00716	0.00716	0.00716	0.00																									

[illegible][illegible]

p.U^2.Si (N)

X=5915m

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
1	0	9.13E-07	3.65E-06	6.85E-06	1.1E-05	1.62E-05	1.92E-05	2.25E-05	2.6E-05	2.98E-05	3.38E-05	3.39E-05	3.4E-05	3.42E-05	3.43E-05	3.44E-05	2.93E-05	2.46E-05	2.03E-05	1.65E-05	1.3E-05	1.45E-05	1.61E-05	1.78E-05	1.96E-05	2.15E-05	1.43E-05	8.61E-06	4.34E-06	1.09E-06	0
2	0	4.16E-06	1.67E-05	2.48E-05	3.46E-05	4.6E-05	5.5E-05	6.48E-05	7.53E-05	8.66E-05	9.88E-05	9.4E-05	8.94E-05	8.48E-05	8.04E-05	7.61E-05	7.21E-05	6.82E-05	6.45E-05	6.08E-05	5.73E-05	5.68E-05	5.64E-05	5.6E-05	5.56E-05	5.52E-05	4E-05	2.72E-05	1.69E-05	4.22E-06	0
3	0	6.91E-06	2.76E-05	4.23E-05	6E-05	8.08E-05	9.13E-05	0.000102	0.000114	0.000127	0.00014	0.000132	0.000125	0.000117	0.00011	0.000104	9.94E-05	9.53E-05	9.14E-05	8.75E-05	8.37E-05	8.39E-05	8.42E-05	8.46E-05	8.49E-05	8.49E-05	6.13E-05	4.16E-05	2.57E-05	4.63E-06	0
4	0	1.08E-05	4.33E-05	6.29E-05	8.61E-05	0.000113	0.000124	0.000135	0.000147	0.000159	0.00017	0.000164	0.000157	0.000149	0.000142	0.000136	0.00013	0.000125	0.000119	0.000114	0.000109	0.000111	0.000114	0.000116	0.000119	0.000121	9.77E-05	7.68E-05	5.84E-05	1.46E-05	0
5	0	1.87E-05	7.48E-05	9.48E-05	0.000117	0.000142	0.000154	0.000168	0.000181	0.000195	0.00021	0.0002	0.000189	0.00018	0.00017	0.000161	0.000155	0.000149	0.000143	0.000137	0.000131	0.000138	0.000144	0.000151	0.000157	0.000164	0.000137	0.000112	8.93E-05	2.36E-05	0
6	0	2.41E-05	9.62E-05	0.000116	0.000138	0.000162	0.000176	0.000191	0.000206	0.000222	0.000239	0.000228	0.000217	0.000206	0.000196	0.000186	0.000178	0.000171	0.000163	0.000156	0.000149	0.000158	0.000166	0.000175	0.000185	0.000194	0.000159	0.000127	9.92E-05	2.48E-05	0
7	0	4.07E-05	0.000163	0.00017	0.000177	0.000185	0.000198	0.000213	0.000227	0.000242	0.000258	0.000247	0.000235	0.000224	0.000213	0.000203	0.000194	0.000186	0.000178	0.000169	0.000162	0.000172	0.000183	0.000194	0.000205	0.000217	0.000145	8.73E-05	4.42E-05	1.1E-05	0
8	0	3.86E-05	0.000155	0.00017	0.000187	0.000205	0.00022	0.000235	0.000251	0.000268	0.000285	0.000268	0.000251	0.000235	0.00022	0.000205	0.0002	0.000194	0.000189	0.000183	0.000178	0.00019	0.000202	0.000215	0.000228	0.000242	0.000207	0.000174	0.000145	3.62E-05	0
9	0	4.74E-05	0.00019	0.000204	0.000218	0.000233	0.000246	0.000259	0.000272	0.000285	0.000299	0.000277	0.000257	0.000237	0.000217	0.000199	0.000198	0.000198	0.000197	0.000196	0.000196	0.000207	0.000219	0.000231	0.000244	0.000257	0.00022	0.000186	0.000155	3.88E-05	0
10	0	5.72E-05	0.000229	0.000236	0.000243	0.00025	0.000263	0.000276	0.000289	0.000303	0.000317	0.000291	0.000267	0.000244	0.000222	0.0002	0.000203	0.000205	0.000208	0.00021	0.000212	0.000222	0.000233	0.000243	0.000254	0.000265	0.000215	0.000169	0.00013	3.24E-05	0
11	0	5.82E-05	0.000233	0.000243	0.000253	0.000263	0.000275	0.000286	0.000298	0.00031	0.000323	0.000298	0.000274	0.000251	0.000229	0.000208	0.000211	0.000213	0.000216	0.000219	0.000222	0.000232	0.000242	0.000252	0.000262	0.000273	0.000226	0.000183	0.000145	3.62E-05	0
12	0	4.59E-05	0.000184	0.000211	0.000241	0.000272	0.000284	0.000295	0.000307	0.000319	0.000332	0.000307	0.000282	0.000259	0.000237	0.000216	0.000221	0.000227	0.000233	0.000239	0.000245	0.000251	0.000258	0.000265	0.000271	0.000278	0.000223	0.000175	0.000132	3.3E-05	0
13	0	5.06E-05	0.000203	0.000227	0.000254	0.000282	0.000291	0.000301	0.000311	0.000321	0.000331	0.000306	0.000283	0.00026	0.000238	0.000217	0.000224	0.000231	0.000238	0.000245	0.000252	0.000259	0.000265	0.000271	0.000278	0.000284	0.000272	0.000261	0.00025	6.24E-05	0
14	0	4.32E-05	0.000173	0.000207	0.000245	0.000286	0.000295	0.000304	0.000314	0.000323	0.000333	0.000309	0.000286	0.000264	0.000242	0.000222	0.000229	0.000236	0.000243	0.000225	0.000258	0.000263	0.000268	0.000274	0.000279	0.000284	0.000274	0.000263	0.000253	6.32E-05	0
15	0	4.89E-05	0.000195	0.000222	0.000249	0.000279	0.000289	0.0003	0.00031	0.000321	0.000332	0.00031	0.000289	0.000268	0.000248	0.000229	0.000237	0.000244	0.000252	0.000259	0.000267	0.000271	0.000275	0.00028	0.000284	0.00027	0.000252	0.000244	5.85E-05	0	
16	0	5.02E-05	0.000201	0.000223	0.000245	0.000269	0.000281	0.000293	0.000305	0.000318	0.000331	0.000308	0.000285	0.000264	0.000243	0.000224	0.000234	0.000244	0.000255	0.000265	0.000277	0.000279	0.000282	0.000285	0.000288	0.00029	0.00028	0.000261	5.35E-05	0	
17	0	2.17E-05	8.7E-05	9.77E-05	0.000109	0.000121	0.00013	0.000139	0.000148	0.000158	0.000168	0.000156	0.000145	0.000134	0.000123	0.000113	0.000118	0.000124	0.00013	0.000136	0.000142	0.000143	0.000144	0.000145	0.000146	0.000147	0.000131	0.000115	0.000101	2.52E-05	0

X=8.516m

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
1	0	4.6E-08	1.84E-07	6.62E-06	7.84E-05	0.000111	3.06E-05	1.82E-05	7.73E-05	6.12E-06	3.76E-05	6.7E-05	7.99E-06	3.04E-05	0.000119	0.000232	0.000214	7.58E-05	9.87E-05	2.69E-05	8.14E-05	1.16E-05	3.99E-05	6.58E-05	0.000103	5.2E-05	0.000273	9.41E-05	2.21E-05	5.53E-06	0
2	0	2.17E-06	8.69E-06	3.91E-05	0.000139	0.000473	0.000353	0.000136	0.000194	4.36E-05	0.000247	0.000371	0.000159	0.000216	0.000315	0.000461	0.000521	0.000353	0.000438	0.000177	0.00042	0.000255	0.000269	0.000552	0.000171	0.000442	0.000371	0.000218	5.46E-05	0	
3	0	1.35E-05	5.39E-05	0.000154	0.000261	0.000674	0.000794	0.000294	0.000291	5.53E-05	0.000553	0.000669	0.000231	0.000282	0.000398	0.000446	0.000587	0.000468	0.000279	0.000493	0.000117	0.000315	0.000307	0.00055	9.19E-05	0.000428	0.000323	0.000227	5.58E-05	0	
4	0	2.73E-05	0.000109	0.000318	0.000348	0.000716	0.000831	0.000315	0.000351	6.36E-05	0.000589	0.000732	0.000162	0.000187	0.000407	0.000494	0.000699	0.000461	0.000449	0.000265	0.000533	0.000117	0.00037	0.000372	0.000591	9.64E-05	0.000497	0.000405	0.000289	7.22E-05	0
5	0	2.95E-05	0.000118	0.000309	0.000253	0.000743	0.000704	0.000282	0.000409	0.000146	0.000534	0.000735	0.000113	0.000136	0.000426	0.00057	0.000821	0.000497	0.00053	0.000312	0.00057	0.000163	0.000474	0.00044	0.000696	0.00011	0.000436	0.000225	4.16E-05	0	
6	0	3.73E-05	0.000149	0.000355	0.000259	0.000841	0.000779	0.000321	0.00044	0.000152	0.000534	0.000734	0.000141	0.000152	0.000457	0.000639	0.000879	0.000581	0.000556	0.000301	0.000615	0.000229	0.000553	0.000506	0.000798	0.000134	0.000517	0.00049	0.000166	4.16E-05	0
7	0	5.29E-05	0.000212	0.000452	0.000279	0.000959	0.000882	0.000474	0.000181	0.000626	0.000776	0.000193	0.000217	0.000537	0.000666	0.000641	0.000594	0.000351	0.000716	0.000283	0.000508	0.000548	0.00075	0.000167	0.000581	0.000568	0.000503	0.000126	0		
8	0	5.03E-05	0.000201	0.000502	0.000248	0.000987	0.000933	0.000435	0.00052	0.0002	0.000704	0.0008	0.000267	0.000239	0.000553	0.000679	0.000953	0.000686	0.000618	0.000385	0.000761	0.000318	0.000628	0.000568	0.000824	0.000199	0.000643	0.000613	0.000444	0.000111	0
9	0	5.11E-05	0.000204	0.000464	0.000244	0.001043	0.000997	0.000461	0.00057	0.000223	0.000645	0.000766	0.000303	0.000259	0.000567	0.000716	0.000993	0.00072	0.000635	0.000343	0.000783	0.000324	0.000652	0.000604	0.000815	0.000235	0.000645	0.000614	0.00045	0.000112	0
10	0	6.11E-05	0.000245	0.000555	0.000209	0.001123	0.001067	0.000451	0.000612	0.000258	0.000706	0.000823	0.000351	0.000301	0.000604	0.000712	0.001007	0.00073	0.000671	0.000401	0.00081	0.00029	0.000653	0.000799	0.000218	0.000702	0.000662	0.000225	5.62E-05	0	
11	0	6.69E-05	0.000267	0.000508	0.000222	0.001027	0.001004	0.000464	0.000591	0.000299	0.000764	0.000787	0.000381	0.000309	0.000627	0.000743	0.00102	0.000751	0.000684	0.000437	0.000815	0.000291	0.000673	0.000615	0.000823	0.000279	0.000719	0.000688	0.000409	0.000102	0
12	0	6.29E-05	0.000252	0.000453	0.000222	0.000981	0.000915	0.000408	0.00062	0.000307	0.000573	0.000334	0.000286	0.000616	0.00074	0.001	0.000739	0.000668	0.000399	0.000815	0.000294	0.000673	0.000615	0.000806	0.000268	0.000663	0.00067	0.000332	8.29E-05	0	
13	0	3.75E-05	0.00015	0.000202	0.000137	0.000423	0.000418	0.000204	0.000301	0.000156	0.000321	0.000361	0.000172	0.000161	0.000278	0.000318	0.000448	0.000359	0.000304	0.000204	0.000398	0.000162	0.000329	0.000314	0.000349	0.000131	0.000327	0.000319	0.000226	5.64E-05	0

X=8.669m

	A	B	C	D	E	F
--	---	---	---	---	---	---

12	0	6.4E-05	0.000256	0.000451	0.00071	0.000347	0.00028	0.001034	0.000238	0.000624	0.000553	0.000541	0.000557	0.000541	0.000348	0.000943	0.000718	0.000389	0.000744	0.000732	0.000429	2.67E-05	0.000444	0.000579	0.000396	0.000911	0.000587	0.00016	0.000567	0.000142	0
13	0	3.61E-05	0.000144	0.000219	0.000303	0.000208	0.00018	0.00048	0.00011	0.000316	0.000276	0.000247	0.000252	0.000239	0.000138	0.000355	0.000282	0.000181	0.000341	0.000334	0.000216	1.66E-05	0.000248	0.000268	0.000162	0.000392	0.000293	8.55E-05	0.00038	9.51E-05	0

X=9.025m

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
1	0	5.73E-06	2.29E-05	0.000192	0.00023	7.83E-05	1.48E-05	5.1E-05	2.66E-06	3.53E-05	7.85E-05	9.9E-05	1.32E-05	0.000131	0.000105	8.61E-05	0.000143	3.26E-05	4.38E-05	0.000263	0.000115	4.78E-05	8.88E-06	5.78E-05	1.62E-05	1.03E-05	9.48E-05	2.13E-05	4.46E-06	1.12E-06	0
2	0	4.15E-05	0.000166	0.000468	0.000344	0.000238	0.000155	0.000256	0.000156	0.000256	0.000179	0.000153	0.00013	0.000458	0.00044	0.000236	0.000337	9.17E-05	0.000228	0.000433	0.000364	0.000317	0.000222	0.000382	0.000155	0.000158	0.00038	0.000116	4.82E-05	1.21E-05	0
3	0	5.83E-05	0.000233	0.000564	0.000505	0.000513	0.000245	0.000417	0.000247	0.00045	0.000264	0.000245	0.000402	0.000818	0.000628	0.000373	0.000426	4.56E-05	0.000245	0.000401	0.000493	0.000672	0.000572	0.000663	0.000227	0.000234	0.000393	0.000237	0.000148	3.69E-05	0
4	0	5.13E-05	0.000205	0.000665	0.000675	0.000822	0.000333	0.000561	0.000344	0.000624	0.000425	0.000337	0.000443	0.000837	0.000688	0.000517	0.000546	3.48E-05	0.000306	0.000397	0.000553	0.00074	0.000674	0.000713	0.000198	0.000197	0.000383	0.000241	0.000199	4.98E-05	0
5	0	4.97E-05	0.000199	0.000711	0.000733	0.000894	0.000349	0.000653	0.000444	0.00061	0.0005	0.000405	0.00034	0.000775	0.000695	0.000667	0.000599	4.07E-05	0.000346	0.000406	0.000598	0.000696	0.00064	0.000609	0.000125	0.00013	0.000353	0.000269	0.00021	5.24E-05	0
6	0	8.05E-05	0.000322	0.000745	0.000751	0.000913	0.000357	0.00073	0.000582	0.000603	0.000534	0.000459	0.000298	0.000753	0.000673	0.00078	0.000672	7.32E-05	0.000358	0.000441	0.000673	0.000721	0.000617	0.000581	7.53E-05	9.44E-05	0.000375	0.000349	0.000162	4.05E-05	0
7	0	7.17E-05	0.000287	0.000755	0.000749	0.000923	0.000342	0.0007	0.000643	0.000639	0.000564	0.000423	0.000261	0.000789	0.000607	0.000811	0.000735	0.000111	0.000366	0.000476	0.000699	0.000766	0.000665	0.000618	7.93E-05	8.43E-05	0.000372	0.000452	0.000138	3.46E-05	0
8	0	6.25E-05	0.00025	0.000781	0.000773	0.000946	0.000339	0.000739	0.000651	0.000675	0.000562	0.00039	0.000249	0.000795	0.000617	0.000812	0.000765	0.000161	0.000383	0.000493	0.00072	0.000779	0.000654	0.000612	7.68E-05	8.35E-05	0.000329	0.000543	0.000161	4.02E-05	0
9	0	6.5E-05	0.00026	0.000809	0.000787	0.001015	0.000401	0.000793	0.000671	0.000686	0.000556	0.000369	0.000243	0.000788	0.00063	0.00083	0.000811	0.000196	0.00039	0.000531	0.000736	0.000793	0.000686	0.00062	5.99E-05	6.3E-05	0.000359	0.000608	0.000122	3.04E-05	0
10	0	0.000104	0.000418	0.000702	0.000812	0.001043	0.000369	0.000783	0.000678	0.000729	0.000587	0.000379	0.000255	0.000723	0.000632	0.000749	0.000885	0.000287	0.000456	0.000579	0.000774	0.000784	0.000688	0.000628	5.35E-05	7.45E-05	0.0003	0.000648	0.000424	0.000106	0
11	0	8.07E-05	0.000323	0.000859	0.000787	0.001049	0.000364	0.000746	0.000732	0.00076	0.000579	0.000389	0.000297	0.000714	0.000619	0.000784	0.000788	0.000259	0.000437	0.0006	0.000789	0.000843	0.000684	0.000659	6.25E-05	6.65E-05	0.000255	0.00066	0.000428	0.000107	0
12	0	3.91E-05	0.000157	0.000613	0.000579	0.000688	0.000338	0.00055	0.000534	0.000559	0.000417	0.000326	0.000288	0.000602	0.000464	0.000604	0.000629	0.000242	0.000356	0.000452	0.000617	0.000666	0.000488	0.000658	8.63E-05	9.1E-05	0.000268	0.000518	0.000331	8.28E-05	0

X=9.178m

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
1	0	3.43E-07	1.37E-06	6.74E-05	0.000165	0.000125	0.000107	6.35E-05	5.97E-06	4.58E-06	9.88E-05	2.98E-05	1.06E-05	9.31E-06	8.22E-05	9.54E-05	0.000103	8.92E-05	3.87E-05	1.07E-05	9.52E-08	1.17E-05	7.08E-06	6.94E-06	1.65E-06	7.63E-08	1.75E-06	1.77E-05	1.29E-06	3.23E-07	0
2	0	9.69E-06	3.88E-05	0.000224	0.000614	0.000553	0.00044	0.000226	0.00016	2.28E-05	0.000229	0.00022	0.000211	8.91E-05	0.000273	0.000442	0.000456	0.000218	0.000289	0.000182	2.84E-05	6.27E-05	0.000131	0.000171	0.000131	8.28E-05	5.63E-05	0.000285	0.000137	3.43E-05	0
3	0	1.42E-05	5.69E-05	0.000282	0.000942	0.000726	0.000568	0.000502	0.000582	0.00025	0.000434	0.000498	0.000536	0.000189	0.000349	0.000561	0.000488	0.000236	0.000439	0.000343	0.000187	0.000168	0.000387	0.000356	0.000332	0.000224	0.000129	0.000555	0.000124	3.1E-05	0
4	0	3.01E-05	0.00012	0.000241	0.000928	0.000767	0.00048	0.000443	0.000735	0.000334	0.000478	0.00055	0.000631	0.000529	0.000366	0.00057	0.000459	0.000233	0.000496	0.000627	0.000623	0.000345	0.000583	0.00044	0.00049	0.000424	0.000175	0.000757	0.00017	4.25E-05	0
5	0	2.71E-05	0.000108	0.000186	0.000897	0.000743	0.00044	0.000244	0.00066	0.000244	0.000449	0.000524	0.000637	0.00051	0.000401	0.000597	0.00047	0.000218	0.000507	0.000651	0.000769	0.000362	0.000607	0.000506	0.000496	0.00039	0.0002	0.000767	0.00019	4.74E-05	0
6	0	2.11E-05	8.45E-05	0.000155	0.000907	0.000748	0.000503	0.000247	0.000549	0.000206	0.000481	0.000538	0.000667	0.00052	0.000453	0.000615	0.000515	0.000215	0.000472	0.00059	0.00064	0.000267	0.000584	0.000391	0.000374	0.00028	0.000104	0.000732	7.2E-05	1.8E-05	0
7	0	3.46E-05	0.000139	0.00022	0.000943	0.000791	0.000479	0.000287	0.000538	0.000258	0.000577	0.000558	0.000701	0.000534	0.000489	0.000623	0.000558	0.00021	0.000481	0.000571	0.000607	0.000286	0.000594	0.000388	0.000409	0.00031	0.00013	0.000752	0.000134	3.35E-05	0
8	0	3.88E-05	0.000155	0.000289	0.000993	0.000793	0.000559	0.000335	0.000546	0.000337	0.000601	0.000611	0.000742	0.000595	0.000532	0.000677	0.000588	0.00034	0.000548	0.000606	0.000605	0.00029	0.000629	0.000369	0.000372	0.000186	9.87E-05	0.00073	0.000252	6.29E-05	0
9	0	3.46E-05	0.000138	0.000301	0.000976	0.0008	0.000612	0.000356	0.000786	0.000368	0.000638	0.000636	0.000782	0.00062	0.000586	0.000682	0.000638	0.000374	0.000569	0.000626	0.000669	0.000308	0.00066	0.000432	0.000321	0.000256	0.000144	0.000788	0.000218	5.45E-05	0
10	0	4.24E-05	0.000169	0.000328	0.001023	0.000794	0.00058	0.00036	0.000875	0.000394	0.000648	0.00064	0.000803	0.000626	0.000615	0.000687	0.000655	0.000355	0.000575	0.000613	0.00068	0.000322	0.00069	0.000369	0.000302	0.000268	0.000105	0.00077	0.000127	3.17E-05	0
11	0	3.7E-05	0.000148	0.00034	0.001036	0.000797	0.000544	0.000331	0.00087	0.000439	0.000544	0.000653	0.000811	0.000611	0.00061	0.000681	0.000631	0.000525	0.000572	0.00059	0.000634	0.000295	0.000669	0.000393	0.000355	0.000285	0.000123	0.00077	0.00015	3.74E-05	0
12	0	1.67E-05	6.66E-05	0.00018	0.000551	0.000422	0.000269	0.000168	0.000457	0.000227	0.000212	0.000365	0.000459	0.000333	0.000352	0.000336	0.000295	0.000154	0.000337	0.000355	0.000359	0.000149	0.000368	0.000212	7.45E-05	0.000118	3.46E-05	0.000409	5.75E-05	1.44E-05	0

X=9.280m

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
1	0	1.55E-05	6.19E-05	0.000328	0.000313	0.000172	0.000151	7.25E-06	1.01E-06	0.000115	0.000231	0.000226	0.000121	0.000144	8.26E-05	6.65E-05	2.77E-05	1.58E-05	6.97E-06	4.67E-05	7.91E-05	0.00012	3.24E-05	0.000194	0.000148	0.000108	5.15E-05	2.9E-06	4.91E-06	1.23E-06	0
2	0	0.000107	0.000428	0.000392	0.000701	0.000279	0.00079	9.01E-05	0.000119	0.00037	0.000525	0.000608	0.000304	0.000361	0.000143	0.000243	9.69E-05	3.64E-05	5.57E-05	0.000106	0.000339	0.000422	0.000218	0.000417	0.00039	0.000521	0.000259	0.000694	8.12E-06	2.03E-06	0
3	0	6.2E-05	0.000248	0.000223	0.00085	0.00019	0.000626	0.000497	0.000361	0.000822	0.00058	0.000676	0.000171	0.000432	9.6E-05	0.000349	0.000238	0.000267	0.000188	7.87E-05	0.000321	0.000572	0.000187	0.000365	0.000361	0.000417	0.000324	0.000838	6.56E-06	1.64E-06	0
4	0	0.000104	0.000418	0.000211	0.000549	0.000119	0.001208	0.000455	0.000398	0.000841	0.000621	0.000676	0.0001	0.000599	6.11E-05	0.000358	0.000235	0.000716	0.000343	0.0001046	0.000162	0.000607	0.000141	0.000325	0.000334	0.000424	0.000105	0.000864	1.13E-05	2.82E-06	0
5	0	0.000169	0.000676	0.000278	0.000875	0.000306	0.001136	0.000358	0.000278	0.000791	0.00076	0.000761	0.000239	0.00056	8.15E-06	0.000558	0.000686	0.000697	0.000446	0.00103	0.000204	0.000619	0.000162	0.000491	0.000487	0.000446	0.000129	0.000885	1.27E-05	3.17E-06	0
6	0	9.73E-05	0.000389	0.000301	0.000887	0.000461	0.001058	0.000336	0.000163	0.000981	0.000817	0.000724	0.000331	0.000554	1.08E-05	0.000495	0.000625	0.000629	0.000555	0.00101	0.000245	0.000688	0.000281	0.000433	0.000403	0.000539	0.000167	0.000934	1.77E-05	4.47E-06	0
7	0	0.000143	0.000573	0.00027	0.000837	0.000519	0.001074	0.000343	0.000211	0.000908	0.00089	0.000912	0.000401	0.000634	2.93E-05	0.000601	0.000723	0.000639	0.000638	0.00092	0.00032	0.000753	0.000401	0.000511	0.000517	0.000607	0.000313	0.001128	2.12E-05	5.31E-06	0
8	0	0.000104	0.000416	0.000349	0.000929	0.000575	0.001064	0.000352	0.00013	0.000818	0.000946	0.00095	0.000378	0.000631	4.91E-05	0.000665	0.000723	0.000677	0.000681	0.000977	0.00035	0.000794	0.000542	0.000564	0.000508	0.000646	0.000262	0.001032	2.62E-05	6.55E-06	0
9	0	0.000104	0.000417	0.000356	0.001017	0.00059	0.001154	0.00047	0.000219	0.000987	0.001002	0.000963	0.000427	0.000649	5.09E-05	0.000706	0.000535	0.000699	0.000719	0.000905	0.000477	0.000883	0.000595	0.000602	0.000593	0.000676	0.000291	0.000864	5.28E-05	1.32E-05	0
10	0	9.79E-05	0.000391	0.000305	0.000935	0.000513	0.001115	0.000607	0.000173	0.000862	0.000984	0.00103	0.000514	0.000737	9.12E-05	0.000791	0.000459	0.000805	0.000753	0.000866	0.000475	0.000863	0.000632	0.000681	0.000688	0.000407	0.000318	0.000698	3.69E-05	9.22E-06	0
11	0	3.55E-05	0.000142	0.000204	0.000612	0.000308	0.000663	0.000309	7.37E-05	0.000564	0.000615	0.000615	0.000306	0.00053	0.000103	0.000291	0.000209	0.00052	0.000416	0.000473	0.000305	0.000612	0.000386	0.000509	0.000541	0.000407	0.000201	0.000671	5.54E-06	1.39E-06	0