



Célia Cristina Paulo Morgado Rodrigues

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Estudo experimental de escoamentos em rios com vegetação nas margens

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Construção

Orientador: João Gouveia Aparício Bento Leal, Professor Auxiliar da Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientador: Maria Teresa Viseu Sarrico Santos, Investigadora Auxiliar do
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques
Arguente: Professor Doutor Pedro Manuel Hora Santos Coelho
Vogal: Professor Doutor João Gouveia Aparício Bento Leal
Vogal: Engenheira Maria Teresa Viseu Sarrico Santos

“Copyright” Célia Cristina Paulo Morgado Rodrigues, FCT/UNL e UNL

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

Agradecimentos

A realização desta dissertação foi o culminar do meu percurso académico e não teria sido possível sem o apoio e amizade de várias pessoas.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor João Leal, não só a oportunidade que me concedeu, como também o apoio e disponibilidade constantes. O Professor foi um dos que mais me inspirou ao longo deste caminho, muito obrigada pela orientação e boa disposição.

Em segundo lugar, agradeço a toda a equipa do LNEC, especialmente à Engenheira Teresa Viseu por me ter dado a oportunidade para fazer os ensaios no canal Veiga da Cunha. O tempo aqui passado foi sem dúvida uma experiência enriquecedora. Agradeço também ao Sr. Jorge por ter feito todas as alterações no canal, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Agradeço, também, o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia, FCT, através do projecto PTDC/ECM/70652/2006.

Gostaria também de agradecer de forma muito sincera:

Ao Engenheiro João Fernandes pela ajuda, orientação e paciência demonstradas ao longo de todo este processo. A sua ajuda foi essencial, não só pelos conselhos dados, como também pelos dados fornecidos. Desejo-lhe boa sorte para a conclusão da sua tese de doutoramento.

Ao colega Javier Soto pela companhia e ajuda no decorrer dos ensaios experimentais.

Aos meus amigos Joaquim Silva, João Fernandes e principalmente ao Pedro Gonçalves pela ajuda directa no decorrer deste trabalho. Muito obrigada por me terem introduzido no *LaTeX* e pelo apoio com o *Matlab*.

Aos meus pais. À minha irmã.

Resumo

Quando um rio esgota a sua capacidade de vazão a água transborda do leito principal para os leitos de cheia, impondo ao mesmo uma configuração de secção composta. Esta situação dá origem a inundações com todos os seus inconvenientes.

As inundações são muitas vezes atribuídas ao aumento da resistência ao escoamento provocada pela presença de vegetação ribeirinha. Esta vegetação, tal como árvores e arbustos, é muitas vezes observada nas margens de rios naturais. Assim, a presente dissertação contribui para o estudo da complexa estrutura do escoamento gerada pela existência de uma linha emergente de vegetação ribeirinha na interface entre o leito principal e o leito de cheia.

De modo a compreender melhor a influência da vegetação na estrutura do escoamento, foram realizados ensaios experimentais, em regime uniforme, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Os ensaios foram efectuados com o auxílio de um velocímetro de *Doppler* acústico (ADV) e tiveram lugar num canal de secção composta com 10m de comprimento e 2m de largura. Neste canal, foram modeladas árvores, com um tronco de 6mm de diâmetro e copa esférica de 9cm, ao longo da interface entre o leito principal e o leito de cheia.

O perfil transversal da velocidade longitudinal é fortemente influenciado pela resistência provocada pelas árvores, na medida em que a velocidade longitudinal diminui localmente atrás das árvores e na interface entre os leitos. Em consequência, o perfil transversal da velocidade apresenta uma forma aproximadamente em "V", com dois pontos de inflexão. Esta característica é muito diferente do caso sem vegetação, no qual o perfil da velocidade tem apenas um ponto de inflexão.

Para várias alturas relativas, analisou-se a influência de diferentes tipos de vegetação na distribuição da velocidade longitudinal, respectiva componente de flutuação e também na distribuição das tensões de Reynolds horizontais e verticais.

Palavras chave:

Canal de secção composta; Vegetação emergente; Capacidade de vazão de rios; Escoamento uniforme.

Abstract

When a river flow reaches the main channel bankfull depth, the water overflows and inundates the floodplains, imposing a compound cross section. Such phenomenon creates floods with all its disadvantages.

Flooding can many times be attributed to the effects of increased flow resistance due to riparian vegetation. This vegetation, such as trees and shrubs, is often seen in the banks of natural rivers. Hence, this thesis investigates the complex flow structure generated by riparian emergent vegetation in the interface between the main channel and the floodplain.

To better apprehend the influence of such vegetation on the flow structure, experimental measurements were carried out, under uniform flow conditions, at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC). The test measurements were done using an acoustic Doppler velocimeter (ADV) in a $10m$ long and $2m$ wide compound channel. In the channel a single line of emergent trees, with $6mm$ diameter trunk and $9cm$ diameter spherical crown, was simulated.

Spanwise profiles of streamwise velocity are influenced strongly by the drag force of trees, because streamwise velocity decreases locally behind trees and near the edge of floodplain. Consequently, a "V" shaped velocity profile appears with two inflection points. This feature is quite different from that observed in non-vegetated cases, in which the velocity profile has a single inflection point.

For several water depths, the influence of different types of vegetation on the distributions of streamwise velocity, fluctuating velocity and Reynolds shear stresses were analyzed.

Keywords:

Compound channel; Emergent vegetation; River conveyance; Uniform flow.

Índice de Matérias

Resumo	i
Abstract	iii
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	xiii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xv
1 Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos e metodologia	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Introdução	5
2.2 Escoamentos em canais com secção composta e fundo liso	5
2.2.1 Estrutura turbulenta	5
2.2.2 Desenvolvimento da camada limite	7
2.2.3 Camada de mistura	8
2.2.4 Correntes secundárias	10
2.2.5 Principais desenvolvimentos	11
2.3 Escoamentos em canais com secção composta e fundo rugoso	14
2.4 Escoamentos em canais com secção composta e árvores	16
2.5 Sumário	20
3 Instalação e procedimento experimental	21
3.1 Introdução	21
3.2 Instalação experimental	21
3.3 Equipamentos de controlo e medição	24
3.4 Procedimento experimental	28
3.4.1 Selecção dos elementos verticais	28
3.4.2 Estabelecimento do regime uniforme	30
3.4.3 Metodologia de medição	33

4	Ensaaios e processamento de dados	35
4.1	Caracterização dos ensaios	35
4.2	Filtragem dos dados e determinação das tensões de Reynolds	37
4.3	Integração dos dados das velocidades	42
4.4	Verificação da consistência global dos dados das velocidades	43
4.5	Determinação dos valores médios em profundidade	44
5	Avaliação da influência da rugosidade nos LC	47
5.1	Introdução	47
5.2	Capacidade de vazão	47
5.3	Distribuição de velocidades	49
5.4	Distribuição das tensões de Reynolds	52
6	Avaliação da influência das árvores na interface	59
6.1	Introdução	59
6.2	Capacidade de vazão	59
6.3	Influência dos elementos verticais - fundo rugoso e árvores	61
6.3.1	Distribuição de velocidades	61
6.3.2	Distribuição das tensões de Reynolds	64
6.4	Influência da posição de medição nos elementos verticais	73
6.4.1	Distribuição de velocidades	73
6.4.2	Distribuição das tensões de Reynolds	76
7	Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros	87
7.1	Conclusões	87
7.2	Sugestões para desenvolvimentos futuros	90
	Bibliografia	91

Índice de Figuras

1.1	Cheias em Rockhampton, Austrália, devido ao transbordo do rio Fitzroy (2011)	1
1.2	Configuração transversal característica de um rio (adaptada de Lencastre, 1996)	2
1.3	Trecho de rios que mostram exemplos de vegetação ribeirinha	3
2.1	Descrição esquemática da estrutura turbulenta em canais com secção composta (adaptada de Shiono e Knight, 1991)	6
2.2	Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma fronteira sólida (retirada de Shames, 1982)	7
2.3	Espessura da camada limite (retirada de Shames, 1982)	8
2.4	Desenvolvimento da camada de mistura (adaptada de Bousmar <i>et al.</i> , 2005)	8
2.5	Representação esquemática de um vórtice horizontal de eixo vertical (adaptada de Prooijen <i>et al.</i> , 2005)	9
2.6	Interação no escoamento (adaptada de Nezu <i>et al.</i> , 1999)	10
2.7	Correntes secundárias (adaptada de Nezu <i>et al.</i> , 1999)	11
2.8	Distribuição da velocidade longitudinal (retirada de Yang <i>et al.</i> , 2007)	12
2.9	Variação temporal da flutuação da velocidade (retirada de Yang <i>et al.</i> , 2007)	13
2.10	Vectores das correntes secundárias (retirada de Yang <i>et al.</i> , 2007)	13
2.11	Tensões de Reynolds τ_{yx} e τ_{zx} (retirada de Yang <i>et al.</i> , 2007)	13
2.12	Distribuição da velocidade longitudinal (retirada de Yang <i>et al.</i> , 2007)	14
2.13	Variação temporal da flutuação da velocidade (retirada de Yang <i>et al.</i> , 2007)	15
2.14	Vectores das correntes secundárias (retirada de Yang <i>et al.</i> , 2007)	15
2.15	Tensões de Reynolds τ_{yx} e τ_{zx} (retirada de Yang <i>et al.</i> , 2007)	16
2.16	Velocidade longitudinal e correntes secundárias (adaptada de Sanjou <i>et al.</i> , 2011)	17
2.17	Comparação entre SKM e ADV (adaptada de Sanjou <i>et al.</i> , 2011)	18
2.18	Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} (adaptada de Sanjou <i>et al.</i> , 2011)	18
2.19	Distribuição da velocidade longitudinal normalizada, U/U_m (adaptada de Sun e Shiono, 2009)	19
3.1	Secção transversal do canal usado no LNEC	21
3.2	Representação esquemática do sistema hidráulico do canal	22
3.3	Sistema de estabilização do escoamento	23
3.4	Fotografias do canal e pormenores	24
3.5	Equipamentos de controlo da alimentação do canal experimental	25
3.6	Plataforma de medição	25
3.7	Pormenor construtivo do Vectrino (www.nortek.no)	26
3.8	Volume de medição do Vectrino	27
3.9	Introdução do <i>seeding</i>	27

3.10	Vegetação ribeirinha mediterrânica dominante	28
3.11	Elemento artificial utilizado para a modelação das árvores	29
3.12	Relação entre o espaçamento entre árvores, E , e o diâmetro do seu tronco, D	29
3.13	Posicionamento dos elementos verticais no canal experimental	30
3.14	Processo adoptado para o estabelecimento de regime uniforme	32
3.15	Secções do canal de referência (vista do canal em planta)	32
3.16	Esquematização das secções medidas: (a) medição a montante (X7705); (b) medição ao centro (X7737); (c) medição a jusante (X7769)	33
3.17	Malha de medição	33
3.18	Direcção e sentido positivo dos eixos	34
4.1	Fotografias do canal experimental com os diferentes fundos estudados	36
4.2	Gráficos <i>Phase-Space</i> (o número de picos detectados está listado no canto superior direito de cada gráfico <i>Phase-Space</i>) (adaptada de Goring e Nikora, 2002)	39
4.3	Aplicação do filtro do <i>WinADV</i> num ponto no centro do leito principal e a 20% da altura de água, para $h_r = 0, 15$ na configuração com elementos verticais	40
4.4	Aplicação do filtro do <i>WinADV</i> num ponto no centro do leito principal e a 20% da altura de água, para $h_r = 0, 20$ na configuração com elementos verticais	41
4.5	Aplicação do filtro do <i>WinADV</i> num ponto no centro do leito principal e a 20% da altura de água, para $h_r = 0, 30$ na configuração com elementos verticais	41
4.6	Esquematização da integração realizada para o cálculo do caudal escoado em determinada secção (retirada de Massa, 2011)	43
4.7	Perfil vertical da velocidade longitudinal em Y100 para $h_r = 0, 15$ na configuração com árvores	45
4.8	Perfil vertical da velocidade longitudinal em Y100 para $h_r = 0, 20$ na configuração com árvores	46
4.9	Perfil vertical da velocidade longitudinal em Y100 para $h_r = 0, 30$ na configuração com árvores	46
5.1	Capacidade de vazão do canal	49
5.2	Capacidade de vazão do leito principal e dos leitos de cheia	49
5.3	Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0, 15$ em fundo liso e rugoso	50
5.4	Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0, 20$ em fundo liso e rugoso	50
5.5	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 15$ em fundo liso	51
5.6	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso	51
5.7	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 20$ em fundo liso	51
5.8	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 20$ em fundo rugoso	51
5.9	Distribuição transversal das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0, 15$ em fundo liso e rugoso	52
5.10	Distribuição transversal das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0, 20$ em fundo liso e rugoso	53
5.11	Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0, 15$ em fundo liso	53
5.12	Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso	54
5.13	Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0, 20$ em fundo liso	54
5.14	Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0, 20$ em fundo rugoso	54
5.15	Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xz} - $h_r = 0, 15$ em fundo liso	55
5.16	Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xz} - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso	55

5.17	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 20$ em fundo liso	55
5.18	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso	55
5.19	Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 15$ em fundo liso e rugoso	56
5.20	Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 20$ em fundo liso e rugoso	56
5.21	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 15$ em fundo liso	57
5.22	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso	57
5.23	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 20$ em fundo liso	57
5.24	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso	57
6.1	Relação entre a capacidade de vazão de cada caso	60
6.2	Influência da árvore para cada altura relativa	61
6.3	Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com e sem árvores	62
6.4	Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com e sem árvores	62
6.5	Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com e sem árvores	62
6.6	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso	63
6.7	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	63
6.8	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 20$ em fundo rugoso	63
6.9	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	64
6.10	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 30$ em fundo rugoso	64
6.11	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	64
6.12	Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com e sem árvores	65
6.13	Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com e sem árvores	65
6.14	Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com e sem árvores	66
6.15	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso	66
6.16	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	66
6.17	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso	67
6.18	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	67
6.19	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso	67
6.20	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	67
6.21	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso	68
6.22	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	68
6.23	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso	69

6.24	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	69
6.25	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso	69
6.26	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	69
6.27	Distribuição transversal da flutuação da velocidade longitudinal $RMS_U - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com e sem árvores	70
6.28	Distribuição transversal da flutuação da velocidade longitudinal $RMS_U - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com e sem árvores	70
6.29	Distribuição transversal da flutuação da velocidade longitudinal $RMS_U - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com e sem árvores	71
6.30	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso	71
6.31	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	71
6.32	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso	72
6.33	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	72
6.34	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso	72
6.35	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	72
6.36	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	73
6.37	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	73
6.38	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	73
6.39	Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais	74
6.40	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	74
6.41	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	74
6.42	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	74
6.43	Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais	75
6.44	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	75
6.45	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	75
6.46	Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	75
6.47	Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais	76
6.48	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	76

6.49	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	77
6.50	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	77
6.51	Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais	77
6.52	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	77
6.53	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	78
6.54	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	78
6.55	Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais	78
6.56	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	78
6.57	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	79
6.58	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	79
6.59	Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais	79
6.60	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	80
6.61	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	80
6.62	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	80
6.63	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	80
6.64	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	81
6.65	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	81
6.66	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	81
6.67	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	81
6.68	Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	82
6.69	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	82
6.70	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	82
6.71	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	83

6.72	Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais	83
6.73	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	83
6.74	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	83
6.75	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	84
6.76	Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais	84
6.77	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)	84
6.78	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)	84
6.79	Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)	85
6.80	Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais	85

Índice de Tabelas

3.1	Resumo dos equipamentos usados nos ensaios	28
4.1	Resumo dos ensaios realizados cujos resultados serão apresentados	35
4.2	Condições hidráulicas - Parte 1	37
4.3	Condições hidráulicas - Parte 2	37
4.4	Resultados da aplicação do filtro do <i>WinADV</i>	42
4.5	Erro entre o caudal calculado e o caudal imposto, ξ - fundo liso	43
4.6	Erro entre o caudal calculado e o caudal imposto, ξ - fundo rugoso	44
4.7	Erro entre o caudal calculado e o caudal imposto, ξ - fundo rugoso com elementos verticais	44

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

DCM	Divided Channel Method
LDM	Lateral Distribution Method
SKM	Shiono and Knight Method
SCM	Single Channel Method

Siglas

ADV	Acoustic Doppler Velocimeter
FCF	Flood Channel Facility
RMS	Root Mean Square
SKHL	State Key Hydraulics Laboratory

Símbolos

A	Constante logarítmica
D	Diâmetro do tronco das árvores
E	Espaçamento entre troncos de árvores
Fr	Número de Froude
H	Altura de água
Hz	Hertz
K_{eq}	Coefficiente de rugosidade equivalente
LC	Leito de cheia
LP	Leito principal
Pa	Pascal
Q	Caudal

Q_c	Caudal calculado
Q_{DCM}	Caudal obtido pelo Divided Channel Method
Q_i	Caudal imposto
Q_{lc}	Caudal do leito de cheia
Q_{lp}	Caudal do leito principal
Q_{SCM}	Caudal obtido pelo Single Channel Method
Q_{total}	Caudal total
R	Raio hidráulico
Re	Número de Reynolds
RMS_U	Flutuação da velocidade longitudinal
$RMS_U d$	Flutuação da velocidade longitudinal média em profundidade
S	Área da secção transversal do canal
U	Velocidade longitudinal
U'	Componente de flutuação da velocidade longitudinal
U_d	Velocidade média em profundidade
U_m	Velocidade média na secção
U_{max}	Velocidade máxima
U_s	Velocidade média na secção
U_*	Velocidade de atrito junto ao fundo
V'	Componente de flutuação da velocidade transversal
(V, W)	Vectores das correntes secundárias
V_A	Velocidade transversal
V_x	Velocidade longitudinal
W'	Componente de flutuação da velocidade vertical
X	Posição longitudinal no canal
Y	Posição transversal no canal
Z	Posição vertical no canal; Profundidade
a	Eixo maior da projecção da elipsóide no plano $\Delta^2 u_i$ versus u_i
b	Eixo menor da projecção da elipsóide no plano $\Delta^2 u_i$ versus u_i

g	Aceração da gravidade
h_{lc}	Altura de água no leito de cheia
h_{lp}	Altura de água no leito principal
h_r	Altura relativa
i	Inclinação média do canal
k	Constante de Von Kármán
lc	Leito de cheia
lp	Leito principal
n	Número da amostra
u	Velocidade média; Velocidade longitudinal
u_i	Velocidade instantânea
v	Velocidade transversal
y	Posição transversal no canal
Δu_i	1ª derivada de u_i
$\Delta^2 u_i$	2ª derivada de u_i
θ	Ângulo de rotação do eixo principal de $\Delta^2 u_i$ versus u_i
λ_U	Parâmetro Universal
ν	Viscosidade cinemática
ξ	Diferença entre o caudal calculado e o imposto
ρ	Massa volúmica
$\hat{\sigma}$	Desvio padrão estimado
σ_u	Desvio padrão de u_i
$\sigma_{\Delta^2 u}$	Desvio padrão de Δu_i
$\sigma_{\Delta u}$	Desvio padrão de $\Delta^2 u_i$
τ_0	Tensões de arrastamento
τ_{xy}	Tensões de Reynolds horizontais
τ_{xyd}	Tensões de Reynolds horizontais médias em profundidade
τ_{xz}	Tensões de Reynolds verticais
τ_{xzd}	Tensões de Reynolds verticais médias em profundidade

1D	Uma dimensão
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações gerais

As inundações (*cf.* Figura 1.1) estão entre os desastres naturais que mais perdas provocam em termos económicos e humanos (Tung, 2005). Berz (2000) concluiu que as inundações são responsáveis por cerca de um terço dos danos materiais e metade das fatalidades atribuídos a acidentes desta natureza em todo o mundo. O mesmo autor realizou estatísticas que mostraram que nos últimos anos tem havido uma tendência para o aumento do número de inundações bem como de prejuízos materiais. Tung (2005) sugeriu que este facto provavelmente se deve às alterações climáticas, tipo de ocupação de terrenos e crescimento da população. É fácil pensar que, à medida que a população mundial continua a crescer, o número de pessoas potencialmente expostas a cheias irá aumentar e consequentemente as perdas económicas também. Deste modo, é fulcral adoptar soluções que atenuem ou até mesmo eliminem os efeitos das inundações.



Figura 1.1: Cheias em Rockhampton, Austrália, devido ao transbordo do rio Fitzroy (2011)

A diminuição do risco de cheias pode ser conseguida através da adopção de medidas estruturais e não-estruturais. A implementação de soluções construtivas de larga escala como construção de barragens, diques e obras de regularização fluvial podem prevenir inundações. No entanto, estas também podem ser prevenidas adoptando soluções não-estruturais, tais como aumentar a legislação relativamente ao tipo de ocupação dos leitos de cheia, melhorar a concepção dos edifícios ou criar sistemas de aviso e planos de emergência (Shamseldin, 2010).

Neste sentido, a 23 de Outubro de 2007, foi aprovada a Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, que diz respeito à avaliação e gestão dos riscos de inundações. Esta directiva tem como objectivo estabelecer um quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundações, de modo a reduzir as consequências associadas às inundações, prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as actividades económicas. Para tal, os Estados-Membros devem elaborar cartas de zonas inundáveis, ao nível das zonas geográficas susceptíveis de serem inundadas, e cartas de riscos de inundações, que indiquem as potenciais consequências prejudiciais associadas às inundações.

É neste contexto que se insere o presente estudo, nos casos em que a precipitação é particularmente intensa e/ou prolongada, fazendo o escoamento do rio exceder a sua capacidade de vazão, transbordando do seu leito principal para o leito de cheia, e obtendo-se uma secção composta, como evidencia a Figura 1.2 (Lencastre *et al.*, 2006).



Figura 1.2: Configuração transversal característica de um rio (adaptada de Lencastre, 1996)

Muitos estudos nesta área têm sido realizados com o objectivo de encontrar soluções para a avaliação de inundações. Quando a secção transversal é composta, o cálculo do escoamento é geralmente feito recorrendo a métodos unidimensionais, que se baseiam na divisão da secção total em secções parciais por meio de verticais. A capacidade de vazão calculada através destes métodos é, contudo, sobrestimada devido à interacção entre o escoamento de elevada velocidade no leito principal em oposição ao escoamento de menor velocidade nos leitos de cheia (*e.g.* Bousmar e Zech, 1999). Esta complexa interacção tem como consequência transferência de massa e de quantidade de movimento do leito principal para os leitos de cheia, promovendo, assim, perda de energia e uma diminuição substancial da capacidade de vazão total nos canais de secção composta (*e.g.* Knight, 2001). Na realidade, a existência de estruturas turbulentas neste tipo de canais confere ao escoamento um carácter tridimensional. O aspecto mais importante no estudo de escoamentos em canais de secção composta é a forte interacção entre os leitos, combinada com complexas correntes secundárias na secção transversal (Nezu, 1994).

Observações de margens de rios mostram que uma linha de vegetação a crescer ao longo da interface entre leitos é bastante comum. A Figura 1.3 apresenta dois exemplos de rios onde existe vegetação nas extremidades do leito principal. Esta vegetação pode ser constituída por árvores ou arbustos de diferentes tipos e com diversos espaçamentos. Uma única linha de vegetação ribeirinha pode ter como função a estabilização das margens, promoção da diversidade ambiental ou melhoria da paisagem (Hubble *et al.*, 2009). O impacto de tais disposições na estrutura do escoamento em canais de secção composta tem sido pouco estudado.

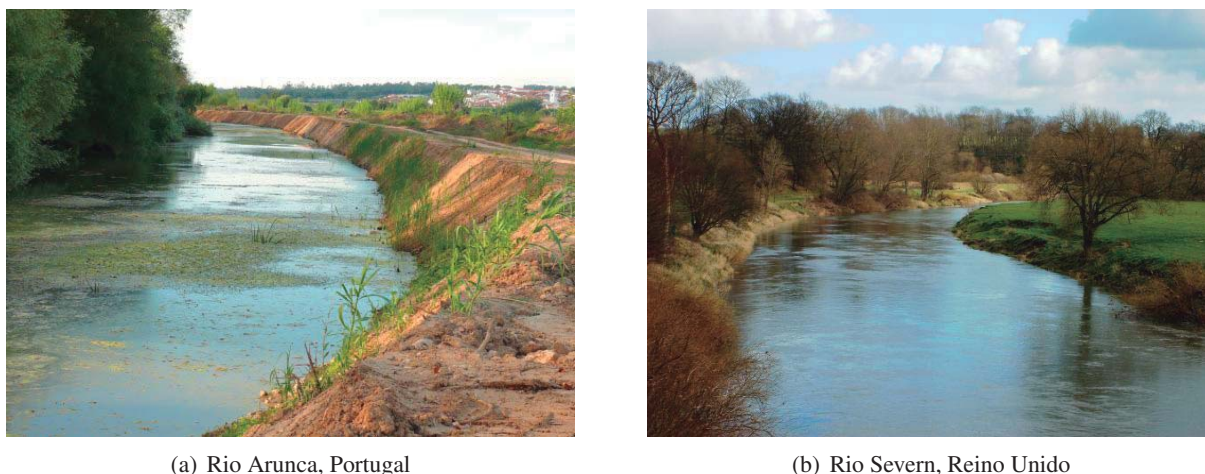


Figura 1.3: Trecho de rios que mostram exemplos de vegetação ribeirinha

A caracterização do escoamento em canais de secção composta é complexa devido à existência de uma região turbulenta na interface entre os escoamentos dos leitos. Esta turbulência dá-se sob a forma de transferência de massa e de quantidade de movimento, a qual diminui a capacidade de vazão e velocidade do leito principal, enquanto os mesmos parâmetros no leito de cheia aumentam. Este efeito é reforçado pelo facto de geralmente a rugosidade do leito de cheia exceder significativamente a do leito principal (Myers *et al.*, 2000). Deste modo, a presença de vegetação no leito de cheia acrescenta mais um grau de dificuldade à caracterização de escoamentos em canais de secção composta.

A fim de tornar mais eficaz a protecção contra cheias e ao mesmo tempo preservar o meio ambiente é necessário um conhecimento mais vasto das consequências da existência de vegetação no leito de cheia e ao longo da berma do leito principal.

1.2 Objectivos e metodologia

A relevância do tema desta dissertação está relacionada com a necessidade de conhecer melhor as características do escoamento em rios cujos leitos de cheias estejam preenchidos por vegetação e que possuam elementos verticais na interface dos leitos. Por conseguinte, definem-se os seguintes objectivos:

- Avaliação da influência da rugosidade dos leitos de cheia no escoamento, em que fundo liso é a situação padrão.
- Avaliação da influência da vegetação ao longo da berma do leito principal no escoamento, em que fundo rugoso é a situação padrão.
- A influência da altura de água será também avaliada.

Foram realizados ensaios num canal experimental onde se caracterizam o campo de velocidades. Os ensaios englobam três tipos de configuração: fundo liso; fundo rugoso; fundo rugoso com elementos verticais. Para cada configuração foram testadas três alturas de água diferentes.

Define-se, assim, a seguinte metodologia:

- Verificação do comportamento do escoamento em situação de regime uniforme para leitos de cheia rugosos, com determinada altura de água escoada (situação padrão).
- Caracterização do comportamento do escoamento em situação de regime uniforme para leitos de cheia rugosos, em função da variação da altura de água.
- Verificação do comportamento do escoamento em situação de regime uniforme para leitos de cheia rugosos e elementos verticais na interface dos leitos, com determinada altura de água escoada.
- Caracterização do comportamento do escoamento em situação de regime uniforme para leitos de cheia rugosos e elementos verticais na interface dos leitos, em função da variação da altura de água.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em sete capítulos e o seu conteúdo é sucintamente descrito a seguir.

Neste primeiro capítulo expõem-se o âmbito e a necessidade de estudar o tema, principalmente quando existem diferentes tipos de rugosidade nos leitos de cheia. Referem-se ainda os objectivos deste trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se a fundamentação teórica necessária para melhor compreender os fenómenos relacionados com o escoamento em canais de secção composta. Faz-se ainda a referência a estudos e conclusões de outros autores, bem como, os recursos teóricos requeridos para interpretar e analisar os resultados obtidos experimentalmente.

Assim, surge a necessidade de descrever a instalação e os equipamentos de controlo e medição utilizados no decorrer do trabalho experimental. É também importante fazer a descrição do procedimento experimental, nomeadamente a selecção dos elementos verticais, obtenção de regime uniforme e os ensaios realizados. O terceiro capítulo é, então, constituído pela caracterização da instalação e procedimento experimental.

No quarto capítulo apresenta-se a caracterização dos ensaios e o modo como o processamento de dados foi feito. Faz-se ainda referência à consistência global dos dados das velocidades e explicita-se a forma como os valores médios em profundidade foram determinados.

O quinto capítulo avalia a influência da rugosidade nos leitos de cheia. Neste capítulo descreve-se e apresenta-se a análise dos dados obtidos nos ensaios experimentais, para as configurações de fundo liso e fundo rugoso, realizados num canal de secção composta no Laboratório de Engenharia Civil. Estes dados são ainda comparados com outros obtidos anteriormente.

O sexto capítulo avalia a influência dos elementos verticais na interface dos leitos. Neste capítulo descreve-se e apresenta-se a análise dos dados obtidos nos ensaios experimentais, para as configurações de fundo rugoso sem e com árvores, realizados no mesmo canal de secção composta. Avalia-se também a influência da posição de medição entre dois elementos verticais consecutivos, através da alteração da posição, no canal experimental, do velocímetro de *Doppler* acústico (*Vectrino*).

Por último, no sétimo capítulo são expostas as conclusões mais relevantes deste trabalho e sugerem-se possíveis estudos para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Introdução

O principal objectivo desta dissertação é o estudo do escoamento em canais com secção composta com elementos verticais na interface entre o leito principal e o leito de cheia. De modo a compreender as complexas características que esta disposição da vegetação impõe ao escoamento, é necessário estudar os casos de complexidade intermédia, nomeadamente quando não existe qualquer tipo de vegetação. Deste modo, as principais características de escoamentos em canais com secção composta são sumariadas neste capítulo.

Os aspectos relevantes para um melhor entendimento deste tema estão divididos da seguinte forma:

- O subcapítulo 2.2 expõe as propriedades gerais de escoamentos em canais com secção composta, com fundo liso.
- Nos subcapítulos 2.3 e 2.4 apresentam-se os resultados de estudos sobre escoamentos em canais com secção composta, com leitos de cheia rugosos e com elementos verticais na interface, respectivamente.
- As principais conclusões da revisão bibliográfica são apresentadas no subcapítulo 2.5.

2.2 Escoamentos uniformes em canais com secção composta e fundo liso

2.2.1 Estrutura turbulenta

Define-se escoamento laminar como sendo aquele no qual o fluido se desloca em camadas e em que há unicamente troca de quantidade de movimento molecular, na medida em que qualquer propensão para instabilidade é amortecida pelas tensões tangenciais que dificultam o movimento relativo entre lâminas contíguas do fluido escoado. Opostamente, num escoamento turbulento, o fluido apresenta um movimento que não é regular e uma elevada troca de quantidade de movimento transversal. O número de Reynolds indica a natureza de um escoamento, ou seja, se este é laminar ou turbulento (*e.g.* Streeter e Wylie, 1982).

A expressão do número de Reynolds (Re) para os escoamentos com superfície livre é:

$$Re = \frac{u4R}{\nu} \quad (2.1)$$

em que: u é a velocidade média (m/s), R o raio hidráulico (m) e ν a viscosidade cinemática (m^2/s).

A mudança entre os dois tipos de escoamentos supracitados ocorre para o número de Reynolds crítico $Re = 2000$. O escoamento processa-se em regime laminar para valores inferiores ao número de Reynolds crítico e em regime turbulento para valores superiores.

Na expressão 2.1, os termos do numerador estão relacionados com forças de inércia ou forças de aceleração/desaceleração do fluido, enquanto o termo do denominador diz respeito às forças de atrito viscoso. Deste modo, o número de Reynolds também pode ser considerado como a relação entre forças de inércia e forças viscosas (Streeter e Wylie, 1982). Para o canal em análise obtiveram-se valores bastante superiores ao número de Reynolds crítico, resultando num escoamento em regime turbulento. Tal já seria de esperar uma vez que, em escoamentos em canais, as forças de inércia são geralmente bastante superiores às forças viscosas.

A turbulência num canal com secção composta com fundo liso dá-se sob a forma de vórtices (*cf.* Figura 2.1).

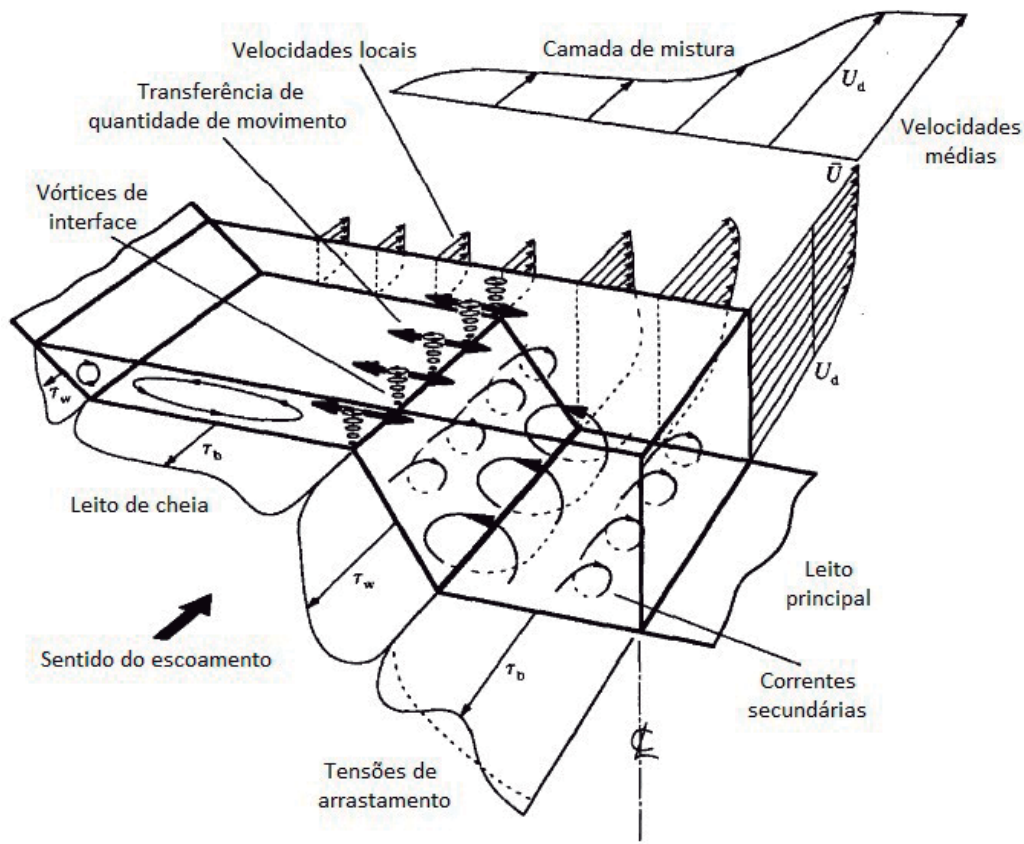


Figura 2.1: Descrição esquemática da estrutura turbulenta em canais com secção composta (adaptada de Shiono e Knight, 1991)

Na Figura 2.1 pode observar-se a existência de dois tipos de vórtices próximos da convergência dos leitos: vórtices horizontais de eixo vertical, na interface do leito de cheia com o leito principal, e vórtices helicoidais de eixo longitudinal, também denominados por correntes secundárias. Estes vórtices serão objecto de estudo mais detalhado nos subcapítulos seguintes, ficando agora apenas a noção que são fenómenos difíceis de analisar por serem tridimensionais e dependerem do tempo. Ademais, podem surgir de modo intermitente no espaço e no tempo (Nezu, 1994). Esta figura ilustra ainda a variação transversal das velocidades e das tensões de arrastamento. A metade superior da figura mostra o crescimento das velocidades desde a margem esquerda do canal até ao centro do leito principal, onde atingem o seu valor máximo. Verticalmente as velocidades decrescem com a profundidade, anulando-se junto ao fundo. As tensões de arrastamento, na parte inferior da ilustração, também crescem do leito de cheia para o leito principal, no centro do qual chegam ao seu valor máximo.

2.2.2 Desenvolvimento da camada limite

Em 1904, Prandtl introduziu o conceito de camada limite que estabelece uma ligação importante entre escoamentos de fluidos perfeitos e de fluidos reais.

Um fluido real ao escoar-se ao longo de uma superfície sólida difere de um fluido perfeito, pois a velocidade de um fluido real junto a essa parede é nula, implicando o aparecimento de tensões tangenciais devido à existência de uma zona com elevado gradiente de velocidade da fronteira sólida para o fluido. Estas tensões tangenciais, inexistentes na hipótese de escoamentos de fluidos perfeitos, diminuem o escoamento (Quintela, 2007). Note-se que esta característica da velocidade ser nula junto a uma superfície é independente da rugosidade da mesma (Massey, 2002). Dá-se então o nome de camada limite à porção de fluido que tem a sua velocidade influenciada pela tensão junto à fronteira sólida. Por conseguinte, esta camada é originada pelo atrito do fundo.

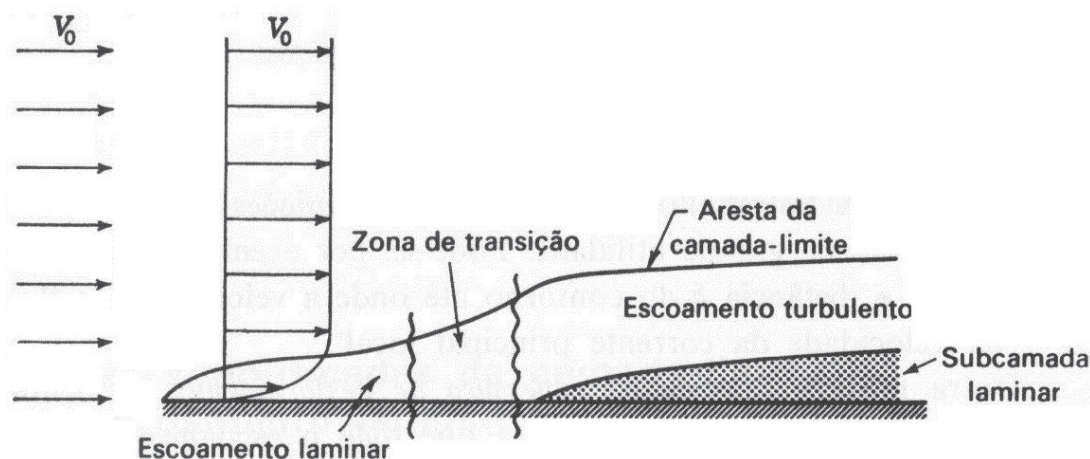


Figura 2.2: Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma fronteira sólida (retirada de Shames, 1982)

Examinando a Figura 2.2, algumas conclusões podem ser retiradas: a velocidade da camada limite aproxima-se assintoticamente da velocidade do escoamento principal; a camada limite é extremamente fina a montante e vai aumentando de espessura para jusante, à medida que esta se desloca sobre a superfície, devido à acção contínua das tensões tangenciais que retardam as partículas do fluido. No

início da superfície, pode observar-se uma região onde o escoamento é laminar. Com o aumento da camada limite atinge-se uma zona de transição na qual o escoamento passa de laminar a turbulento, passando as partículas do fluido a ter um comportamento errático. Na região turbulenta e à medida que as partículas se aproximam da fronteira sólida, a turbulência diminui de tal modo que prevalecem os efeitos laminares, criando uma subcamada laminar, mostrada na Figura 2.2 (e.g. Streeter e Wylie, 1982).

Existem diversas definições quanto à sua espessura (cf. Figura 2.3). Neste texto considera-se que a espessura da camada limite é a distância δ medida desde a superfície sólida até ao ponto onde a velocidade do fluido seja igual a 99% da velocidade do escoamento principal, isto é, quando $u = 0,99u_m \approx u_m$ (Shames, 1982).

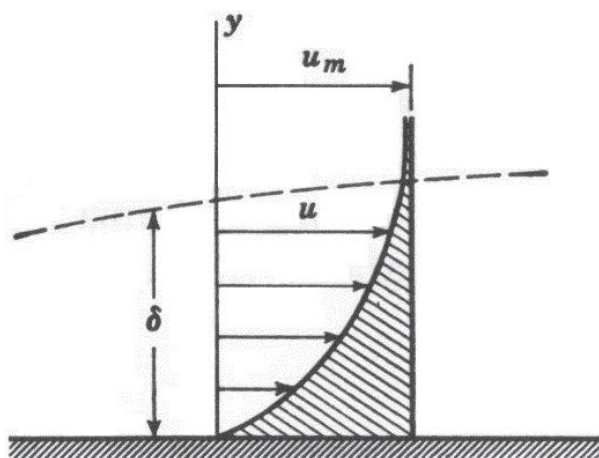


Figura 2.3: Espessura da camada limite (retirada de Shames, 1982)

2.2.3 Camada de mistura

Quando o escoamento do leito principal excede a capacidade de vazão de um rio, o leito de cheia fica inundado. A diferença entre a maior velocidade e profundidade do leito principal com a menor velocidade e, geralmente, maior rugosidade do leito de cheia, leva à formação da chamada camada de mistura.

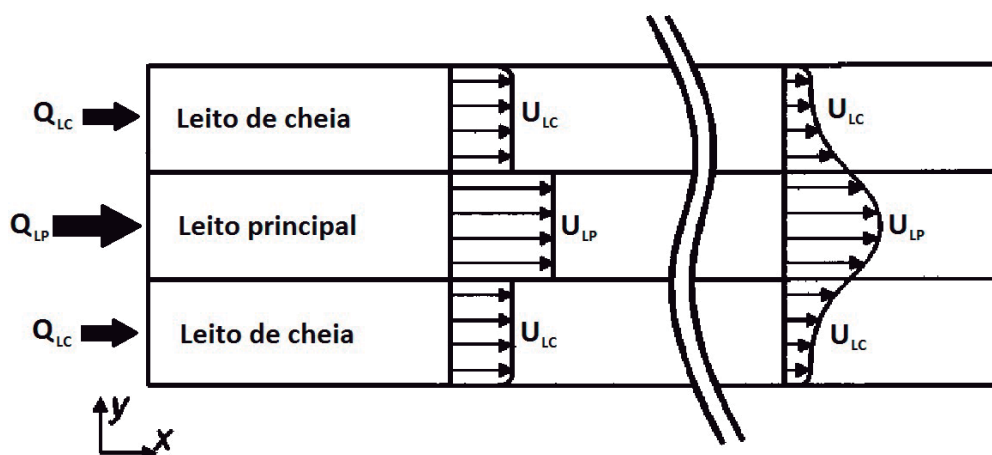


Figura 2.4: Desenvolvimento da camada de mistura (adaptada de Bousmar *et al.*, 2005)

As velocidades num canal de secção composta, com alimentação independente entre o leito principal e o leito de cheia, podem ser esquematizadas como mostra a Figura 2.4. É possível observar, a montante, a introdução de diferentes caudais no leito principal e nos leitos de cheia. Com o desenvolvimento da camada de mistura, na secção do canal mais a jusante, é notório a redução da velocidade junto à parede sólida do canal, em ambos os lados, e a zona de transição entre a menor velocidade do leito de cheia para a maior velocidade do leito principal. Este diferencial de velocidades entre os leitos gera os vórtices horizontais de eixo vertical referidos anteriormente, que originam o atrito na interface (*cf.* Figura 2.5).

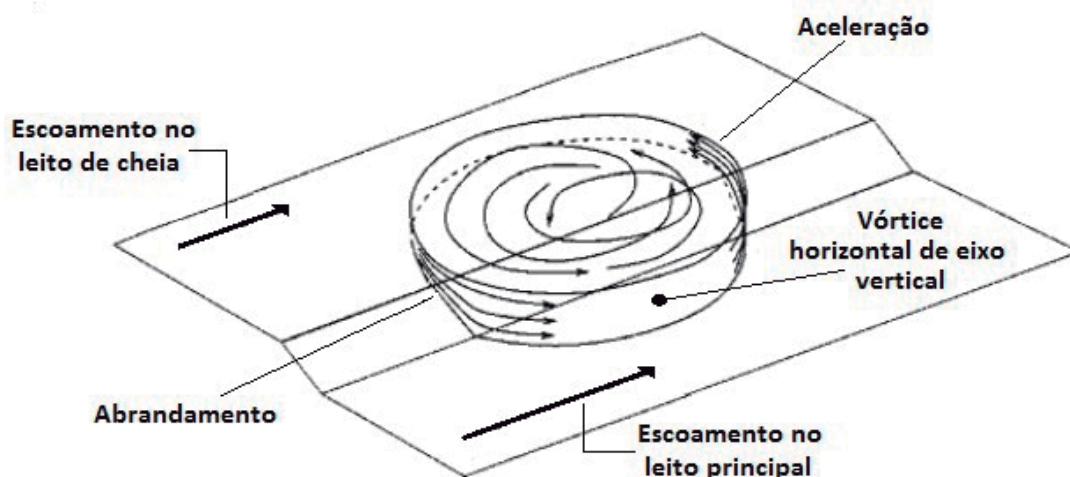


Figura 2.5: Representação esquemática de um vórtice horizontal de eixo vertical (adaptada de Prooijen *et al.*, 2005)

Estes vórtices, primeiramente identificados por Sellin (1964) através da introdução de pó de alumínio na água, transportam quantidade de movimento do leito principal para o leito de cheia. Em consequência, a capacidade de descarga do leito principal diminui e a do leito de cheia aumenta, fazendo com que a capacidade de vazão total do canal diminua. Este fenómeno foi denominado efeito cinemático, do inglês "*kinematic effect*" (Yang *et al.*, 2007).

O padrão e a intensidade destes vórtices são extremamente influenciados pela altura relativa (h_r) do escoamento (Nezu *et al.*, 1999), sendo mais intensos quanto menor for h_r . A altura relativa é um parâmetro adimensional que estabelece o rácio entre a altura do escoamento do leito de cheia (h_{LC}) e a do leito principal (h_{LP}), como evidencia a expressão 2.2 a seguir apresentada:

$$h_r = \frac{h_{LC}}{h_{LP}} \quad (2.2)$$

Nezu *et al.* (1999) mostraram que para os casos em que a altura relativa é menor que 0,375, os centros dos vórtices horizontais são quase sempre localizados na interface dos leitos. Contrariamente, para os casos em que h_r é maior que 0,375, os vórtices são divididos em duas regiões - região do leito principal e região do leito de cheia. Assim, para esta situação, podem ser observados dois conjuntos de vórtices no escoamento em canais com secção composta.

Nas condições da Figura 2.6(a), onde as tensões de Reynolds são bastante elevadas, geram-se vórtices horizontais de grande escala na interface do leito principal com o leito de cheia. Por outro lado,

para alturas relativas superiores a 0,375, geram-se vórtices com eixo de rotação perpendicular ao do escoamento e que são mostrados na Figura 2.6(b) pela elipse negra. Estes vórtices dividem o canal em duas regiões e, por isso, pode-se observar um par de vórtices horizontais (Nezu *et al.*, 1999).

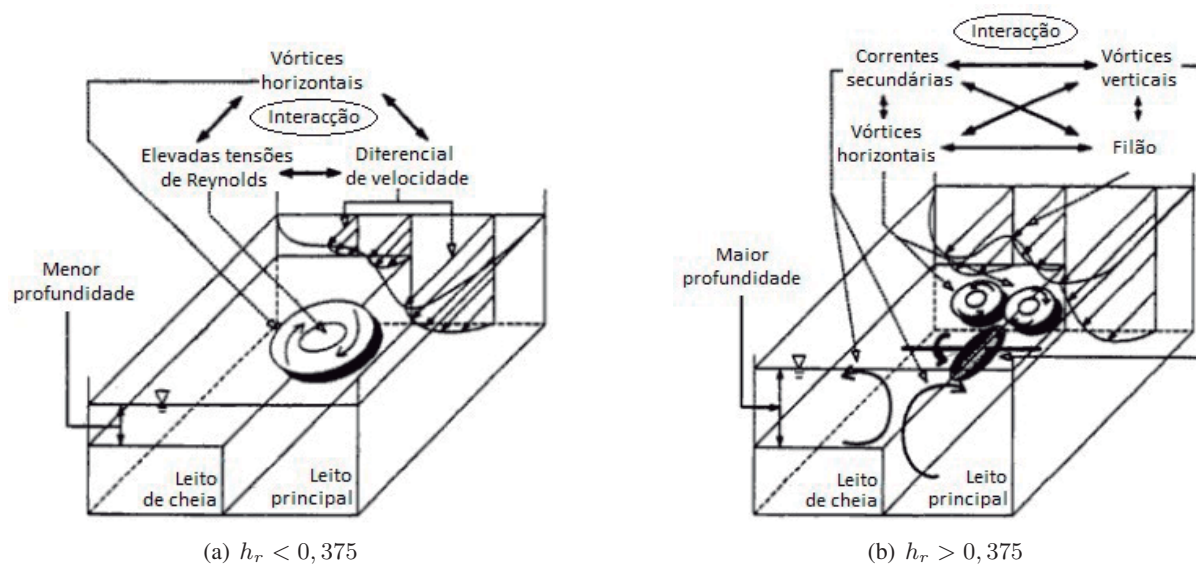


Figura 2.6: Interação no escoamento (adaptada de Nezu *et al.*, 1999)

2.2.4 Correntes secundárias

As correntes secundárias foram formalmente classificadas em duas categorias - primeiro e segundo tipo - por Prandtl (1952). As correntes secundárias do primeiro tipo derivam das forças centrífugas. Podem ocorrer tanto em escoamentos laminares como em turbulentos. Por outro lado, as correntes secundárias do segundo tipo são geradas pela heterogeneidade e anisotropia da turbulência. Em comparação com as correntes secundárias do segundo tipo, as do primeiro tipo são muito mais simples e mais fortes, contudo a sua força propulsora não é a turbulência e por isso neste texto só se consideram as correntes de segundo tipo (Nezu, 1994).

Deste modo, além dos vórtices horizontais referidos no subcapítulo anterior, a estrutura turbulenta é também constituída por correntes secundárias que geram atrito adicional ao escoamento. Estas correntes são vórtices helicoidais de eixo longitudinal, formam-se devido à anisotropia da turbulência e as suas características são influenciadas por diversos factores, tais como a geometria da secção transversal do canal, respectiva relação de proporção e altura relativa do escoamento (Shiono e Knight, 1991).

A Figura 2.7 mostra os vectores de velocidade das correntes secundárias calculados por Nezu *et al.* (1999). Os ensaios tiveram lugar num canal com 10 m de comprimento e 40 cm de largura, constituído por um leito principal e um leito de cheia.

Para $h_r = 0,167$ e $h_r = 0,286$, observa-se a formação de uma pequena célula de correntes secundárias junto à interface no leito principal. Em contraste, uma circulação clara das células pode ser observada para $h_r = 0,375$, $h_r = 0,50$ e $h_r = 0,75$. Para estas três alturas relativas, observa-se a formação

de duas células de correntes secundárias: uma com sentido horário da interface para o leito principal e outra com sentido anti-horário da interface para o leito de cheia. Na base do leito principal e junto à interface existe uma outra célula com sentido anti-horário. O escoamento inclinado ascendente que se desloca desde a interface até à superfície livre do leito principal deve-se à anisotropia da turbulência, que ocorre devido à interacção entre o escoamento no leito principal e o escoamento no leito de cheia (Nezu, 1994). Pode ainda concluir-se da Figura 2.7 que a intensidade das correntes secundárias aumenta com o aumento da altura relativa.

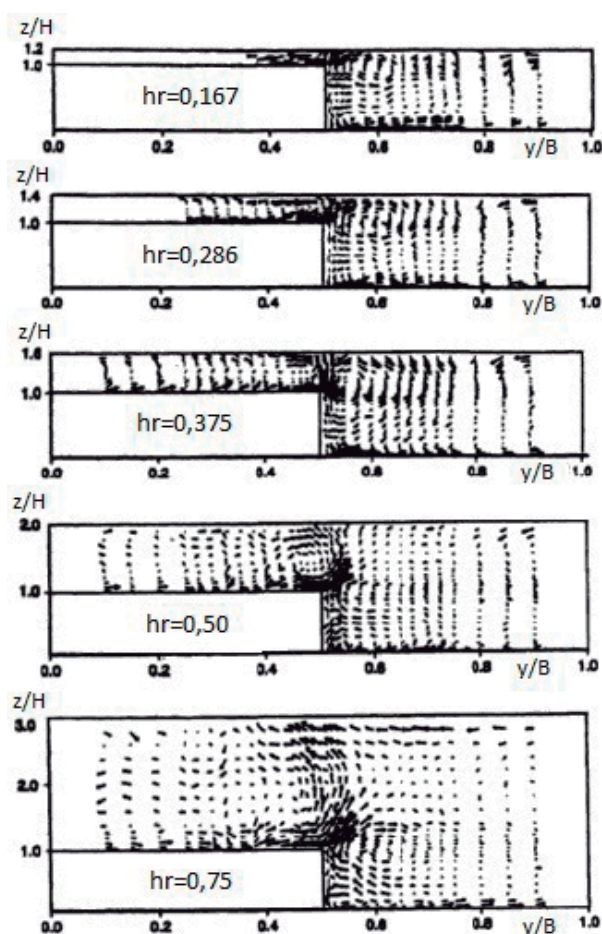


Figura 2.7: Correntes secundárias (adaptada de Nezu *et al.*, 1999)

2.2.5 Principais desenvolvimentos

As primeiras experiências laboratoriais em canais com secção composta e fundo liso foram realizadas por Posey (1967), Sellin (1964) e Zheleznyakov (1971), e mostraram que os métodos utilizados para o cálculo da capacidade de vazão de canais simples não eram exactos quando aplicados a canais com secção composta. Mais tarde surgiram os estudos de Rajaratnam e Ahmadi (1979), Myers e Elsayy (1975), Knight e Demetriou (1983), Knight e Hamed (1984) e Knight *et al.* (1994) focados na interacção entre o leito principal e o leito de cheia e na distribuição das tensões tangenciais. Mais recentemente, uma quantidade significativa de modelações físicas em laboratório tem sido realizada em canais com

secção composta, como por exemplo, o trabalho efectuado no *Flood Channel Facility* (FCF) descrito por Knight e Sellin (1987). Knight e Shiono (1990) analisaram as características do escoamento e as tensões de Reynolds, τ_{yx} e τ_{zx} na região da camada de mistura, desenvolvendo o *Shiono and Knight method* (SKM) para prever a distribuição da velocidade média em profundidade e das tensões tangenciais em canais com secção composta. SKM é um método de distribuição lateral, do inglês *lateral distribution method* (LDM), baseado na consideração de correntes secundárias e vorticidade e pode ser utilizado em qualquer canal, independentemente da sua forma, desde que este possa ser decomposto em elementos lineares. Outros métodos, para analisar a capacidade de descarga de um canal com secção composta, foram desenvolvidos por Ackers (1993), que formulou o "*coherence method*" (COHM), Wang (1989) e Xie (1982), que recorreram à teoria da transferência da quantidade de movimento, Ji e Hu (1998) e Zhou (1994), que integraram as equações de Navier-Stokes em profundidade, e ainda Huang e Cai (1990), que usaram métodos da camada limite. Wang (1986) obteve distribuições de velocidade 3D e a capacidade de vazão total usando também as equações de Navier-Stokes. Os métodos que consideram a transferência de quantidade de movimento em comparação com os métodos da divisão do canal, geralmente são melhores e conduzem a resultados mais parecidos com os obtidos experimentalmente (Yang *et al.*, 2007).

Apresentam-se agora vários resultados experimentais obtidos por Yang *et al.* (2007). As experiências tiveram lugar num canal com 16 m de comprimento, 30 cm de largura e 40 cm de altura do *State Key Hydraulics Laboratory* (SKHL), da Universidade de Sichuan. Foram feitas medições de descarga, velocidade e turbulência sob condições de regime uniforme.

A Figura 2.8 apresenta a distribuição da velocidade longitudinal, na secção, para um caudal de 17,72 l/s e canal com fundo liso. Como seria de esperar, a velocidade decresce com a profundidade e verificam-se velocidades mais baixas no leito de cheia em comparação com o leito principal.

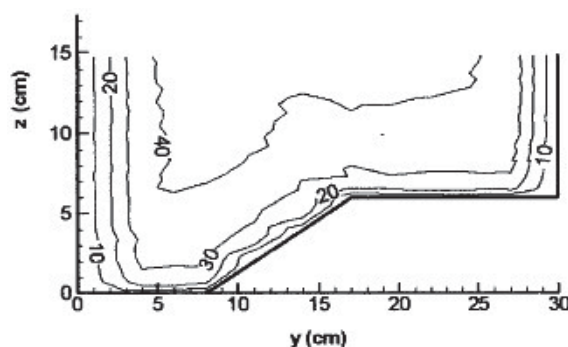


Figura 2.8: Distribuição da velocidade longitudinal (retirada de Yang *et al.*, 2007)

A taxa de transporte de sedimentos e as tensões de Reynolds estão ambas relacionadas com as flutuações da velocidade. Assim, o estudo destas flutuações é bastante importante (Yang *et al.*, 2007). A Figura 2.9 ilustra, para um caudal de 10,95 l/s e canal com fundo liso, a variação temporal da turbulência das componentes u e v na interface entre o leito principal e o leito de cheia e a 1 cm do fundo. Os registos mostram a periodicidade da flutuação da velocidade longitudinal, u , e as alterações correspondentemente na velocidade transversal, v .

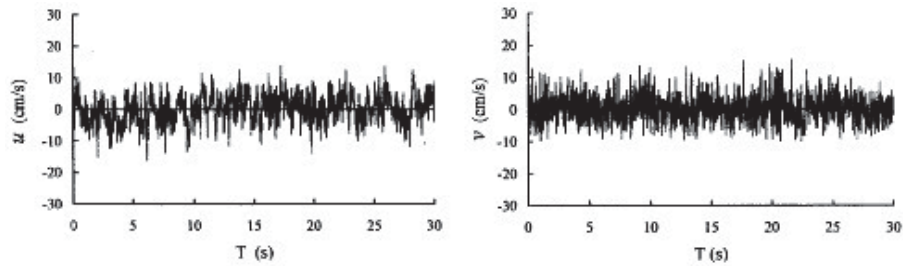


Figura 2.9: Variação temporal da flutuação da velocidade (retirada de Yang *et al.*, 2007)

A Figura 2.10 mostra que para um canal com fundo liso e altura relativa elevada, aproximadamente 0,7, as correntes secundárias não são muito fortes, ao contrário do que seria de esperar. No entanto, confirma-se o escoamento inclinado ascendente nos cantos reentrantes.

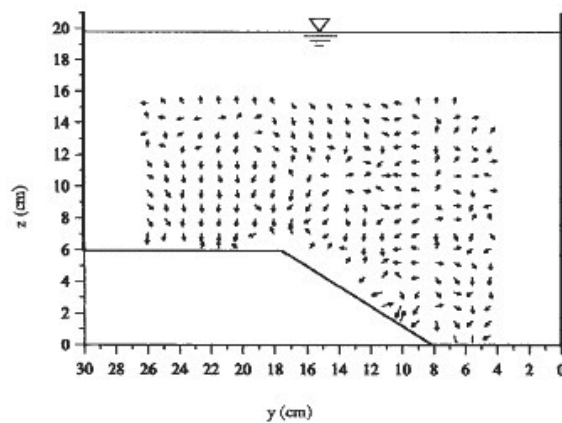


Figura 2.10: Vectores das correntes secundárias (retirada de Yang *et al.*, 2007)

Expõem-se agora as tensões de Reynolds, τ_{yx} e τ_{zx} , para um caudal de $17,72 \text{ l/s}$ e canal com fundo liso (*cf.* Figura 2.11). Porque geralmente a velocidade do escoamento é mais elevada no leito principal do que no leito de cheia, uma camada de mistura é criada na interface dos leitos. Em consequência, é na interface ($y = 17 \text{ cm}$) que aparecem as tensões de Reynolds mais altas.

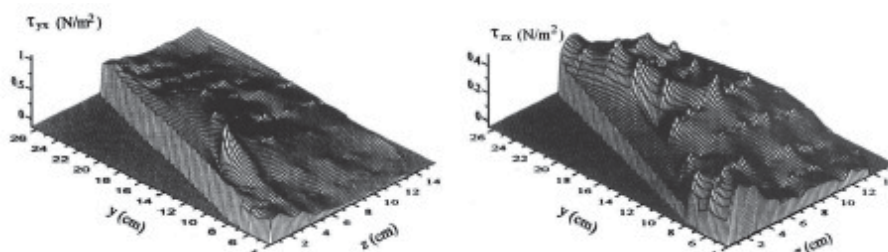


Figura 2.11: Tensões de Reynolds τ_{yx} e τ_{zx} (retirada de Yang *et al.*, 2007)

2.3 Escoamentos uniformes em canais com secção composta e leitos de cheia rugosos

Em rios naturais, os leitos de cheia são muitas vezes o habitat de vários tipos de vegetação. A vegetação geralmente aumenta a resistência ao escoamento, altera a distribuição da velocidade e afecta a capacidade de descarga e a taxa de transporte de sedimentos. Os resultados experimentais de Huang *et al.* (1999, 2002) mostraram que a velocidade no leito principal aumenta significativamente depois de os leitos de cheia serem cobertos por vegetação. Shi (2002) deduziu uma fórmula que define a quantidade de escoamento que passa dos leitos de cheia para o leito principal baseando-se apenas na observação e nos seus próprios resultados experimentais. Darby e Thorne (1996) desenvolveram um modelo computacional para prever o impacto do crescimento da vegetação na resistência ao escoamento e na capacidade de descarga dos rios. Thornton *et al.* (2000) avaliaram experimentalmente a tensão tangencial aparente na interface entre o leito principal e os leitos de cheia com e sem vegetação. Kang e Choi (2004) usaram um modelo de tensões de Reynolds para reproduzir o escoamento dos rios com leitos de cheia rugosos, tendo em conta a anisotropia da turbulência na superfície livre. Como o comportamento hidráulico do escoamento de rios com leitos de cheia rugosos é complexo, foram realizados vários ensaios, também na Universidade de Sichuan, com diferentes tipos de vegetação nos leitos de cheia, tais como relva, árvores e arbustos, de modo a elucidar a estrutura do escoamento (Yang *et al.*, 2007).

Apresenta-se assim uma breve comparação entre os dados apresentados na secção 2.2.5 e os dados obtidos por Yang *et al.* (2007) para leito de cheia revestido por relva artificial.

A Figura 2.12 mostra, para as mesmas condições de escoamento, a distribuição da velocidade longitudinal para o leito de cheia liso e rugoso, (a) e (b) respectivamente. Na figura pode-se observar o aumento significativo da velocidade no leito principal após a colocação da relva, bem como a sua diminuição no leito de cheia.

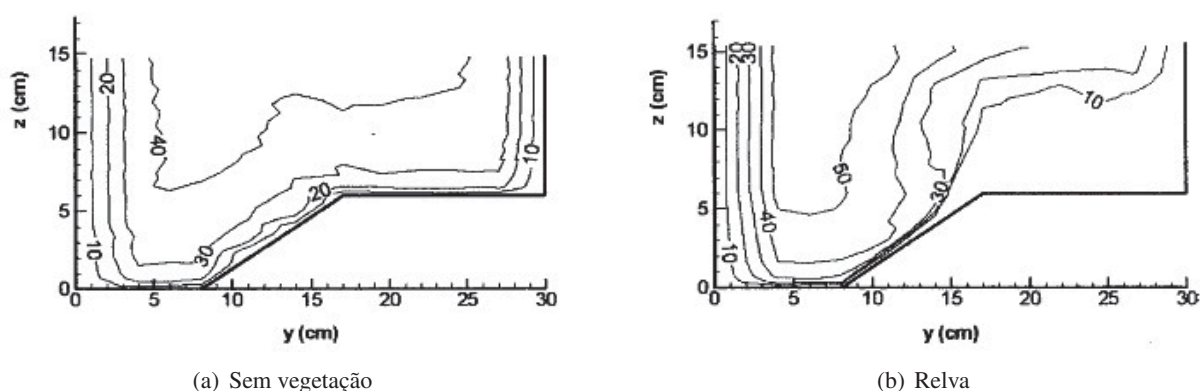


Figura 2.12: Distribuição da velocidade longitudinal (retirada de Yang *et al.*, 2007)

Para as mesmas condições de escoamento, apresenta-se na Figura 2.13 a variação temporal das componentes u e v na interface entre os leitos, para o leito de cheia liso e com relva, (a) e (b) respectivamente. Em ambos os casos nota-se a periodicidade da flutuação da velocidade longitudinal, u , e as alterações correspondentes na velocidade transversal, v . No entanto, a intensidade da turbulência aumenta de (a) para (b) como resultado da presença da rugosidade.

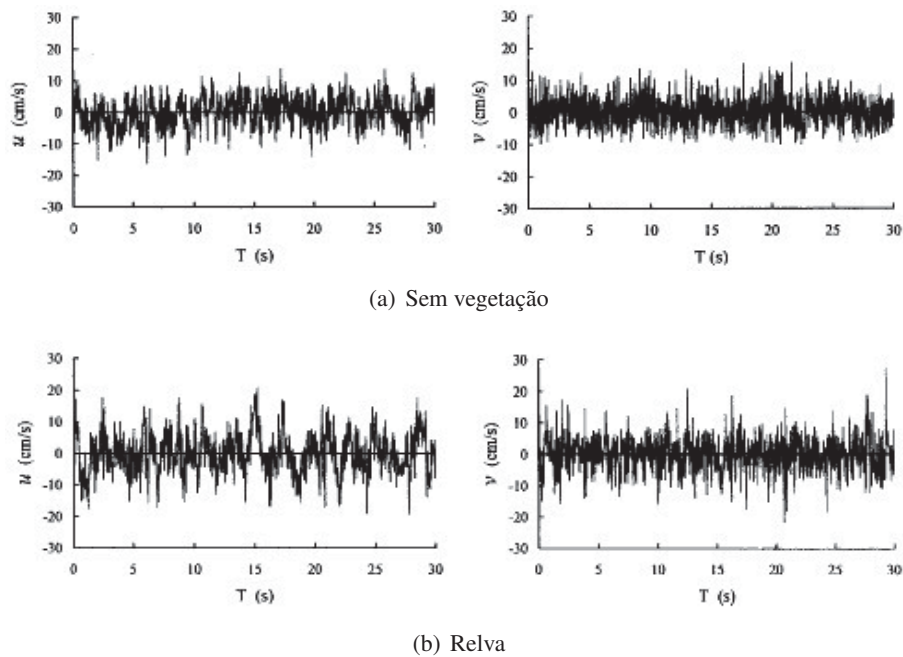


Figura 2.13: Variação temporal da flutuação da velocidade (retirada de Yang *et al.*, 2007)

Também para as mesmas condições de escoamento, a Figura 2.14 mostra os vectores das correntes secundárias para o leito de cheia liso (a) e com relva (b). Devido à influência da rugosidade, a estrutura das correntes secundárias altera-se, podendo-se observar no leito de cheia com relva a presença de algumas pequenas células de correntes secundárias.

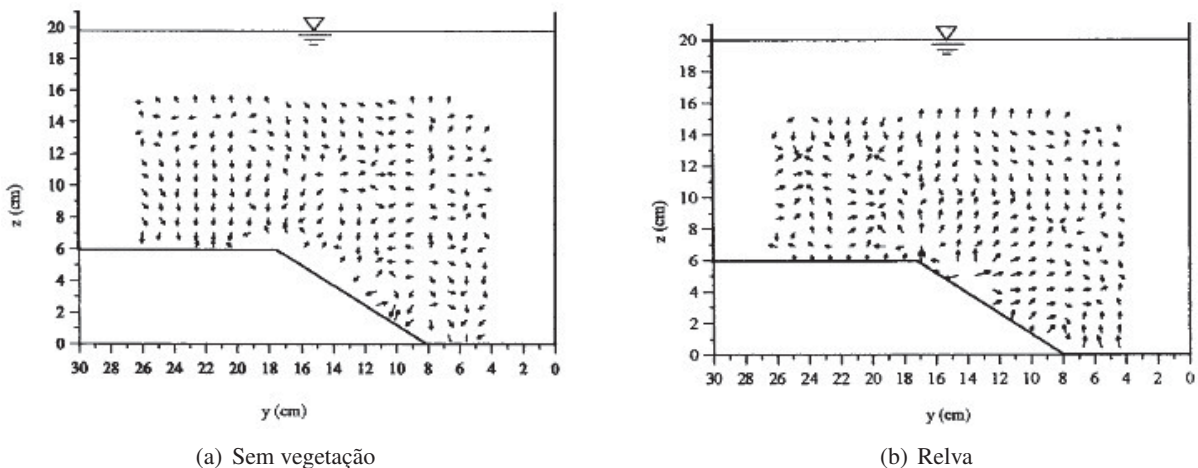


Figura 2.14: Vectores das correntes secundárias (retirada de Yang *et al.*, 2007)

Na figura 2.15 mostram-se as tensões de Reynolds, τ_{yx} e τ_{zx} , para os casos de leito de cheia liso (a) e leito de cheia com relva (b). Ambos têm o mesmo caudal, mas diferentes alturas relativas. Ao contrário do que acontece em (a), onde as tensões de Reynolds são sempre positivas, em (b), a relva retarda o escoamento fazendo com que as tensões tomem valores negativos, claramente evidenciados na vertente inclinada que separa os leitos ($y = 8 \text{ cm}$ a $y = 17 \text{ cm}$).

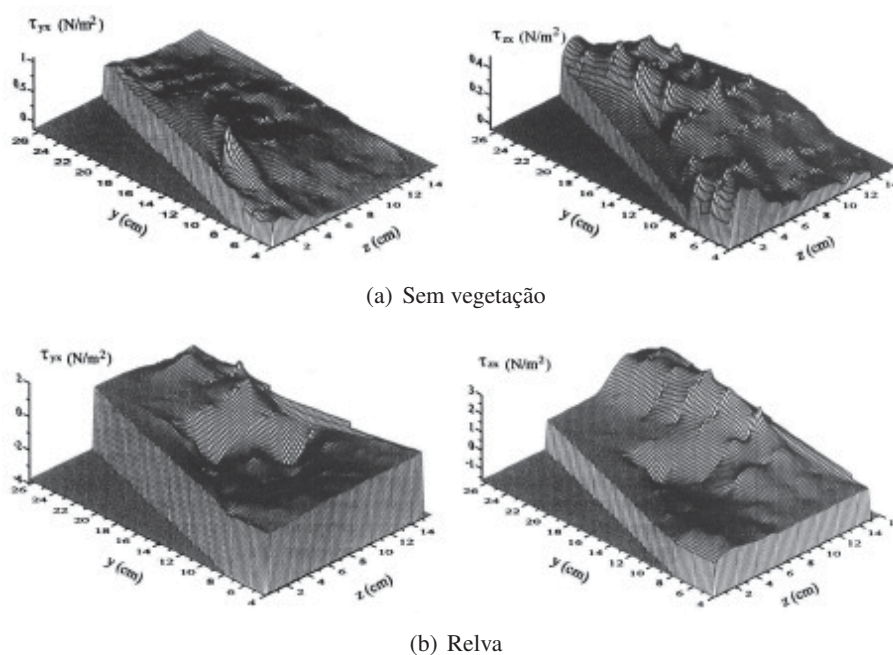


Figura 2.15: Tensões de Reynolds τ_{yx} e τ_{zx} (retirada de Yang *et al.*, 2007)

2.4 Escoamentos uniformes em canais com secção composta e elementos verticais na interface dos leitos

A influência da vegetação ribeirinha nos processos ecológicos e hidráulicos tem-se tornado cada vez mais reconhecida como uma componente integrante da gestão de recursos hídricos. A vegetação, como árvores e arbustos, comumente ocorre ao longo das margens dos rios e pode crescer naturalmente ou ser plantada pelo homem como meio para prevenir erosões, preservação de habitat e melhoria da paisagem. Todavia, o efeito desta vegetação nas inundações, transferências de massa e transporte de sedimentos é muito pouco conhecido.

Sun e Shiono (2009) realizaram ensaios num canal com secção composta com elementos verticais na interface dos leitos e avaliaram os efeitos daqueles elementos no atrito de fundo. Shiono *et al.* (2009) consideraram um factor de resistência ao escoamento provocada pela vegetação no *Shiono and Knight method*, SKM, tendo sido obtidos resultados parecidos com os medidos experimentalmente. Contudo, continuam a existir muitas incertezas quanto ao comportamento das correntes secundárias e da estrutura turbulenta para este caso (Sanjou *et al.*, 2010).

A seguir apresentam-se os resultados dos ensaios efectuados por Sanjou *et al.* (2011). As medições foram conduzidas num canal com 10 m de comprimento e 1,5 m de largura e através de um *Doppler* acústico 3D (ADV). Para simular a vegetação emergente foram colocados cilindros com 2 cm de diâmetro e 25 cm de altura, com espaçamento de 10 cm, na interface entre o leito principal e o leito de cheia.

A Figura 2.16 mostra as distribuições da velocidade longitudinal U e dos vectores das correntes secundárias, ambos normalizados pela velocidade máxima U_{max} . Para o caso (a) sem vegetação existem diferenças significativas nas velocidades longitudinais na interface. Também na interface,

podem ser observadas as típicas correntes secundárias já referidas anteriormente, isto é, a existência de escoamento inclinado ascendente que se desloca desde a interface até à superfície livre do leito principal. Opostamente, no caso (b) com vegetação emergente, a velocidade longitudinal do escoamento desacelera localmente na interface entre leitos e reconhecem-se vórtices de eixo longitudinal em ambos os leitos. Por conseguinte, pode-se afirmar que a vegetação emergente tem um papel importante na estrutura turbulenta e na transferência de massa e de quantidade de movimento.

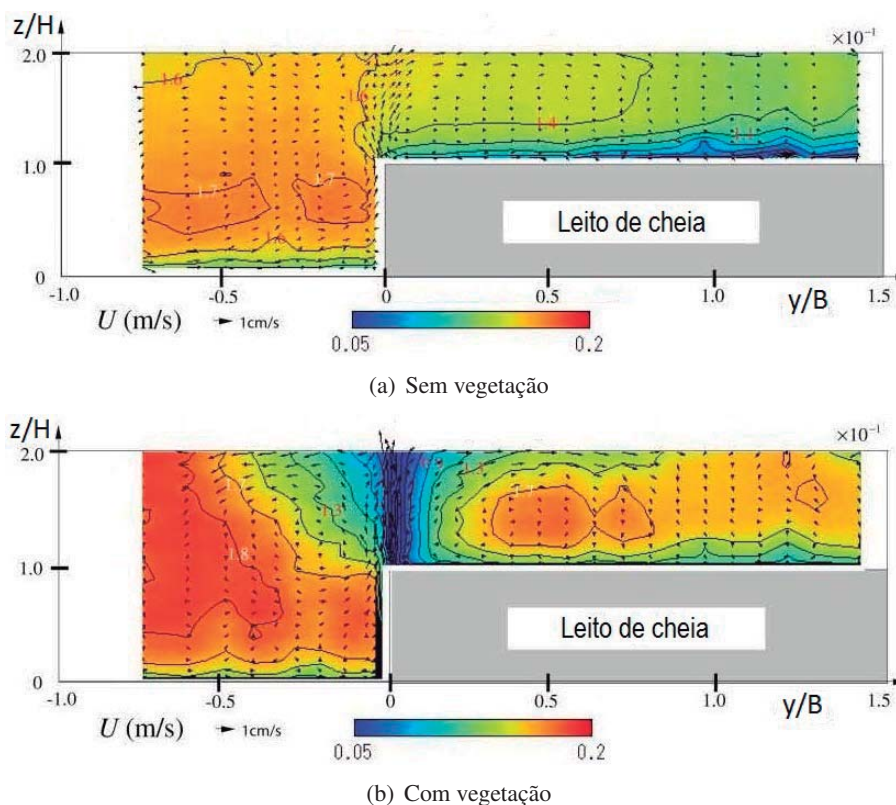


Figura 2.16: Velocidade longitudinal e correntes secundárias (adaptada de Sanjou *et al.*, 2011)

A comparação da distribuição transversal da velocidade média em profundidade obtida pelo método teórico, SKM, e a obtida experimentalmente, é apresentada na Figura 2.17. No caso (a) sem vegetação, existe apenas um ponto de inflexão na interface entre o leito principal e o leito de cheia. Por outro lado, no caso com vegetação (b) existem dois pontos de inflexão, devido ao facto de a velocidade do escoamento desacelerar localmente atrás das árvores. Como se pode observar, os resultados obtidos por ambos os métodos são similares.

A Figura 2.18 mostra as distribuições das tensões de Reynolds τ_{xy} com e sem vegetação. Para o caso (a) sem vegetação, é de particular relevância a zona de tensões negativas na interface entre o leito principal e o leito de cheia. Deste resultado pode-se concluir que quando os vórtices horizontais são acompanhados por tensões de Reynolds elevadas, irão existir transferências de quantidade de movimento significativas entre a elevada velocidade do leito principal e a baixa velocidade do leito de cheia. Para o caso (b), as zonas positivas e negativas de tensões aparecem atrás da vegetação, facto que é bastante diferente do caso sem vegetação. Os valores das tensões de Reynolds são bastante superiores para o caso com vegetação.

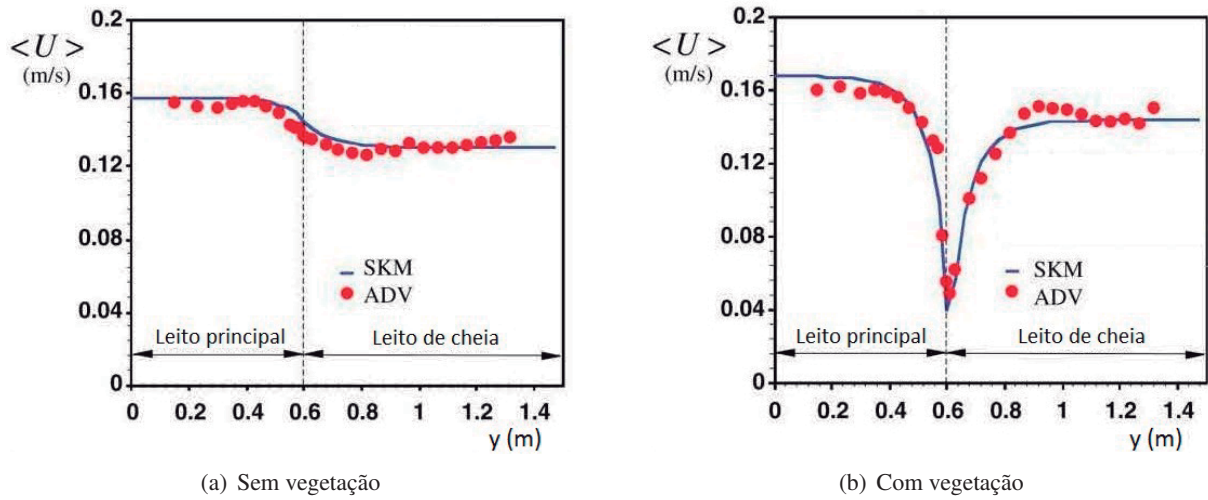


Figura 2.17: Comparação entre SKM e ADV (adaptada de Sanjou *et al.*, 2011)

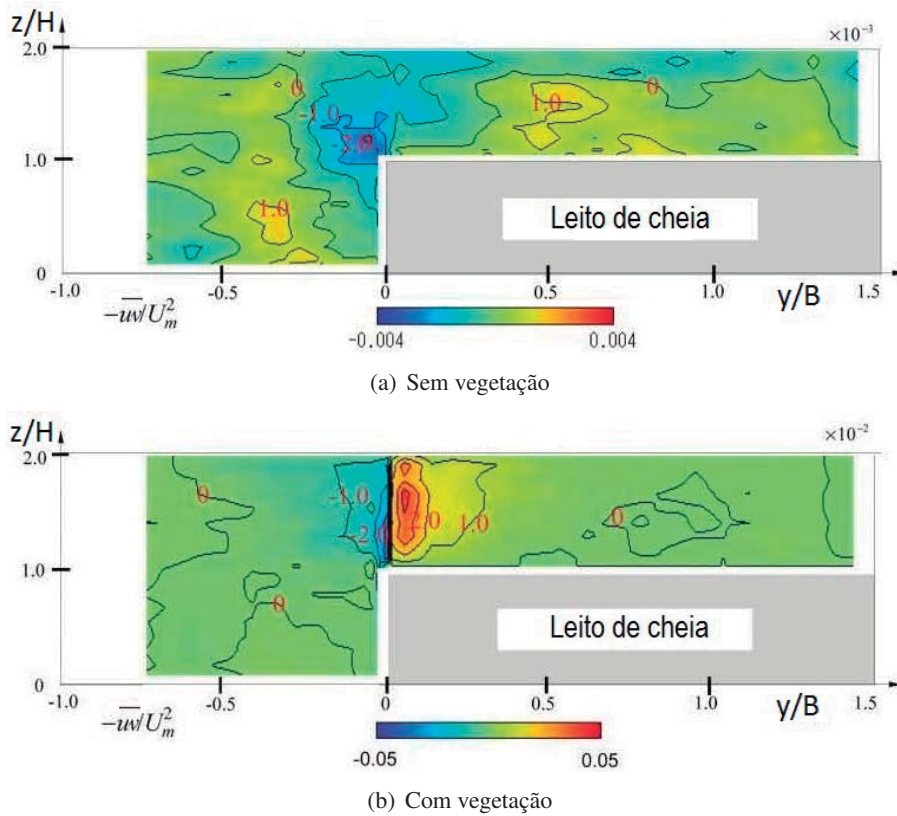


Figura 2.18: Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} (adaptada de Sanjou *et al.*, 2011)

Seguidamente apresentam-se os resultados, relativos à velocidade longitudinal (*cf.* Figura 2.19), dos ensaios efectuados por Sun e Shiono (2009) com recurso a um tubo de Pitot. As medições tiveram lugar num canal com 12 m de comprimento e 0,306 m de largura no laboratório da Universidade

de *Loughborough*, Inglaterra. Foram usados troncos circulares de madeira para modelar a vegetação emergente, com diâmetro de 9 mm e 10 cm de altura. Os troncos foram colocados na interface entre o leito principal e o leito de cheia e realizaram-se três tipos de ensaios: sem troncos; troncos com espaçamento de 12 cm e troncos com espaçamento de 4 cm.

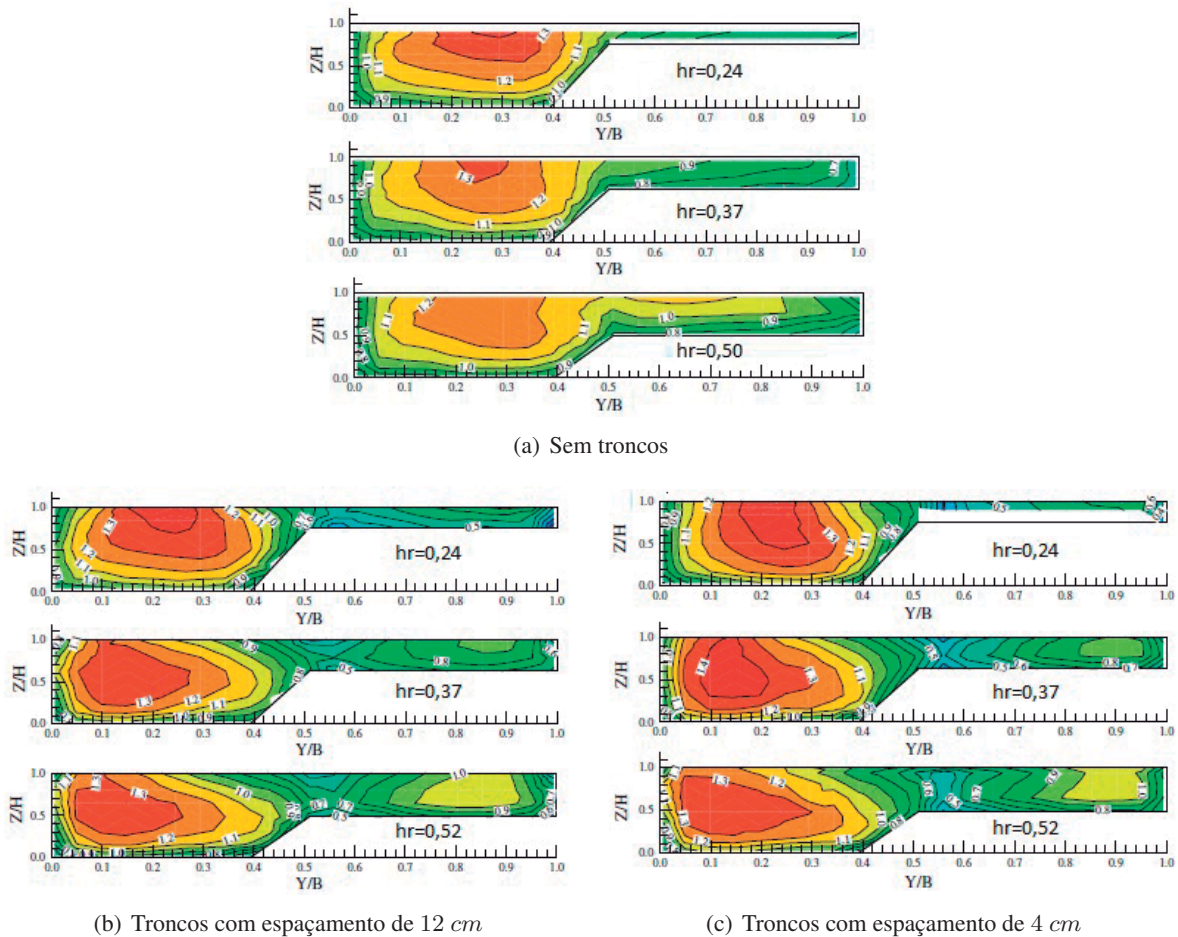


Figura 2.19: Distribuição da velocidade longitudinal normalizada, U/U_m (adaptada de Sun e Shiono, 2009)

A Figura 2.19(a) apresenta a distribuição da velocidade longitudinal normalizada, U/U_m , para as alturas relativas de 0,24, 0,37 e 0,52, para a configuração sem troncos. U_m é a velocidade média na secção. Para $h_r = 0,50$, pode observar-se, na interface, uma protuberância nas isolinhas, característica típica de elevadas alturas relativas em canais com secção composta. Esta protuberância na interface aumenta com o aumento da altura relativa. Shiono e Knight (1989) e Tominaga e Nezu (1991) concluíram que este fenómeno é causado pelas correntes secundárias e pela elevada transferência de quantidade de movimento do leito principal para o leito de cheia (Sun e Shiono, 2009).

Na configuração com troncos espaçados de 12 cm (*cf.* Figura 2.19(b)), existe uma "camada de mistura livre" ao longo da berma do leito principal, zona altamente influenciada pelo efeito das correntes secundárias. Outra diferença significativa é o deslocamento das zonas de velocidade máxima do leito principal para o centro do mesmo e do leito de cheia para a parede lateral. Esta característica também se

deve às correntes secundárias e é devida à presença dos troncos. Para a mesma altura relativa, o caso dos troncos espaçados de 4 cm (cf. Figura 2.19(c)) apresenta resultados idênticos em relação à configuração com troncos espaçados de 12 cm. Refere-se apenas que o deslocamento das zonas de velocidade máxima para o fundo do leito principal e para a parede lateral do leito de cheia é para este caso mais notória, devido à maior quantidade de troncos (Sun e Shiono, 2009).

2.5 Sumário

A revisão bibliográfica evidenciou os parâmetros importantes que se devem considerar no estudo e compreensão de escoamentos em canais de secção composta. Estes parâmetros incluem o número de Reynolds (Re) e a altura relativa (h_r).

Vários conceitos teóricos foram definidos: estrutura turbulenta, camada limite, camada de mistura e correntes secundárias. Destacam-se os seguintes aspectos: a camada limite turbulenta é provocada pelo atrito do fundo e o fluido dentro dela tem a sua velocidade influenciada pela tensão junto às fronteiras sólidas; a camada de mistura, constituída por vórtices com eixo vertical, é gerada pelo atrito de interface e a sua intensidade diminuiu com o aumento da altura relativa; as correntes secundárias, constituídas por vórtices helicoidais de eixo longitudinal, geram atrito adicional ao escoamento e a sua intensidade aumenta com o aumento da altura relativa.

Concluiu-se que a introdução de vegetação no leito de cheia origina um aumento da velocidade do leito principal e a diminuição da do leito de cheia. Este facto tem como consequência a diminuição da capacidade de vazão do canal. Analisando a variação temporal da flutuação da velocidade, viu-se que a intensidade da turbulência aumenta com a introdução da rugosidade.

A estrutura das correntes secundárias altera-se desfavoravelmente com a colocação da vegetação. A linha emergente de vegetação na interface provoca a formação de vórtices de eixo longitudinal em ambos os leitos, promovendo a diminuição das velocidades atrás das árvores.

As tensões de Reynolds atingem valores máximos na interface, devido à diferença da elevada velocidade do leito principal e baixa velocidade do leito de cheia. Com a introdução da rugosidade, a resistência ao escoamento aumenta provocando um aumento substancial destas tensões.

Em suma, a existência de uma linha única de vegetação na interface entre o leito principal e o leito de cheia, bem como o facto de este último ser rugoso, assume um papel extremamente importante na estrutura turbulenta do escoamento e nas transferências de massa e de quantidade de movimento. Assim, esta dissertação tem como objectivo investigar experimentalmente o modo com os elementos verticais e a rugosidade do leito de cheia afectam a estrutura do escoamento em canais com secção composta.

Capítulo 3

Instalação e procedimento experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se a instalação experimental e os procedimentos de ensaio. O subcapítulo 3.2 descreve a instalação experimental, que consiste num canal com secção composta existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e o subcapítulo 3.3 expõe os equipamentos de controlo e medição. Os instrumentos utilizados incluem hidrómetros para medir as alturas de água e um velocímetro de *Doppler* acústico ADV, denominado *Vectrino*, para medir a velocidade do escoamento. O subcapítulo 3.3 faz a descrição do procedimento experimental adoptado nas medições e na recolha dos dados. Refere-se e explica-se, igualmente, a razão da escolha dos elementos verticais utilizados. O estabelecimento de regime uniforme é explicitado.

Faz-se ainda uma breve referência às limitações do canal, problemas encontrados ao longo da campanha experimental e respectivas soluções. O objectivo principal deste capítulo é descrever o funcionamento do canal e dos equipamentos utilizados nos ensaios deste estudo.

3.2 Instalação experimental

As medições foram conduzidas no Canal Veiga da Cunha, que tem 10 m de comprimento, do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). A Figura 3.1 mostra a secção transversal deste canal simétrico, em que os parâmetros geométricos são a largura de rastro com 0,40 m, largura dos leitos de cheia com 0,70 m, altura do leito principal com 0,10 m e vertente inclinada a 45°. O canal tem ainda um declive longitudinal de 0,0011 m/m.

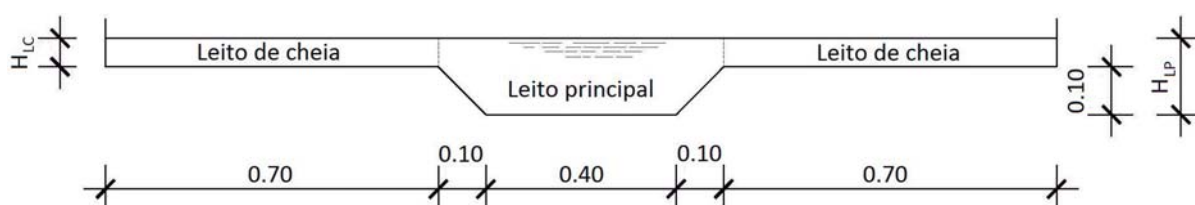


Figura 3.1: Secção transversal do canal usado no LNEC

Uma representação esquemática do sistema hidráulico do canal é dada na Figura 3.2. A água é bombeada, através de duas bombas (11, *cf.* Figura 3.2), de um reservatório subterrâneo (10, *cf.* Figura 3.2) para outro elevado (1, *cf.* Figura 3.2). O reservatório elevado possui um descarregador de superfície (13, *cf.* Figura 3.2) que garante que o nível da água seja constante quando o reservatório atinge a sua capacidade máxima. Deste modo, quando se abrem as válvulas de seccionamento a montante (3, *cf.* Figura 3.2), o caudal que entra por gravidade no canal (7, *cf.* Figura 3.2) é constante. Por outro lado, se estas válvulas estiverem fechadas a água é descarregada directamente para o reservatório subterrâneo (10, *cf.* Figura 3.2). A montante existe uma válvula de seccionamento (5, *cf.* Figura 3.2) que permite a evacuação total da água do canal.

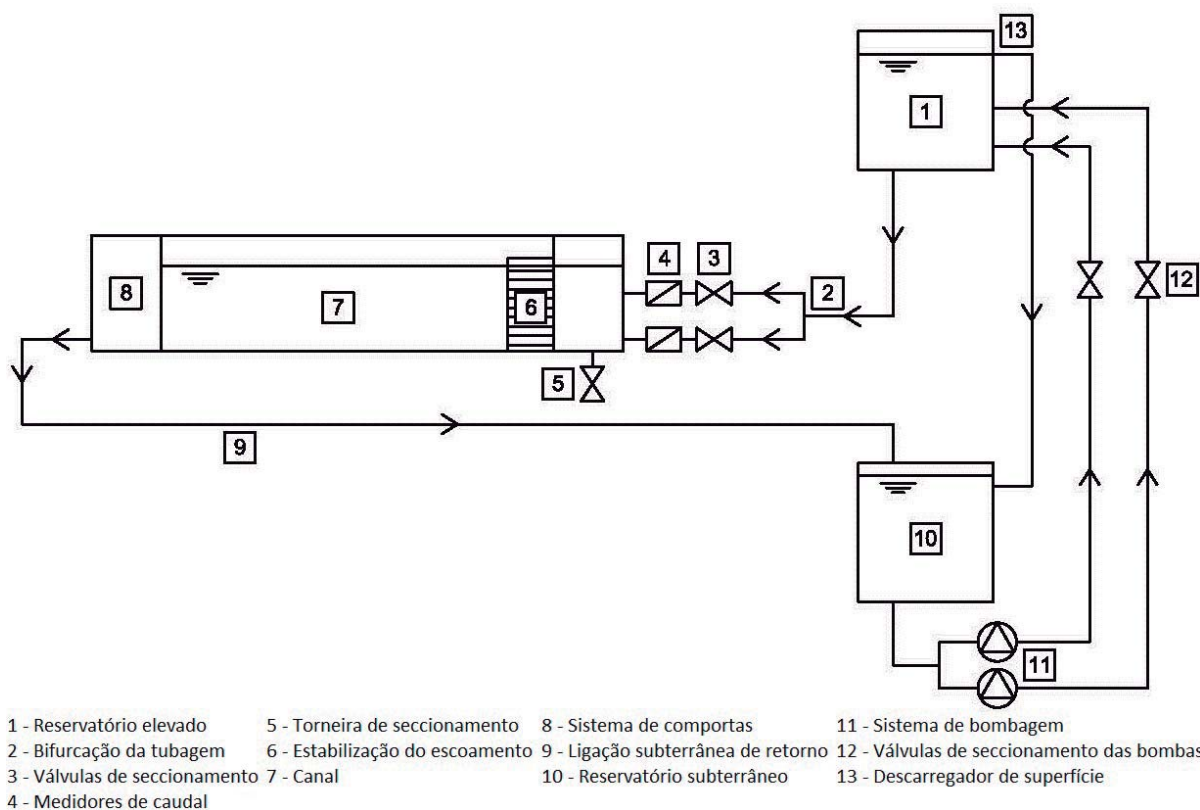


Figura 3.2: Representação esquemática do sistema hidráulico do canal

A água que desce do reservatório é dividida através de uma bifurcação na tubagem (2, *cf.* Figura 3.2), permitindo que a alimentação do leito principal e dos leitos de cheia seja feita separadamente. O controlo do caudal é conseguido através de duas válvulas de seccionamento (3, *cf.* Figura 3.2) e por dois caudalímetros (4, *cf.* Figura 3.2), correspondendo a uma válvula e um medidor de caudal para cada leito.

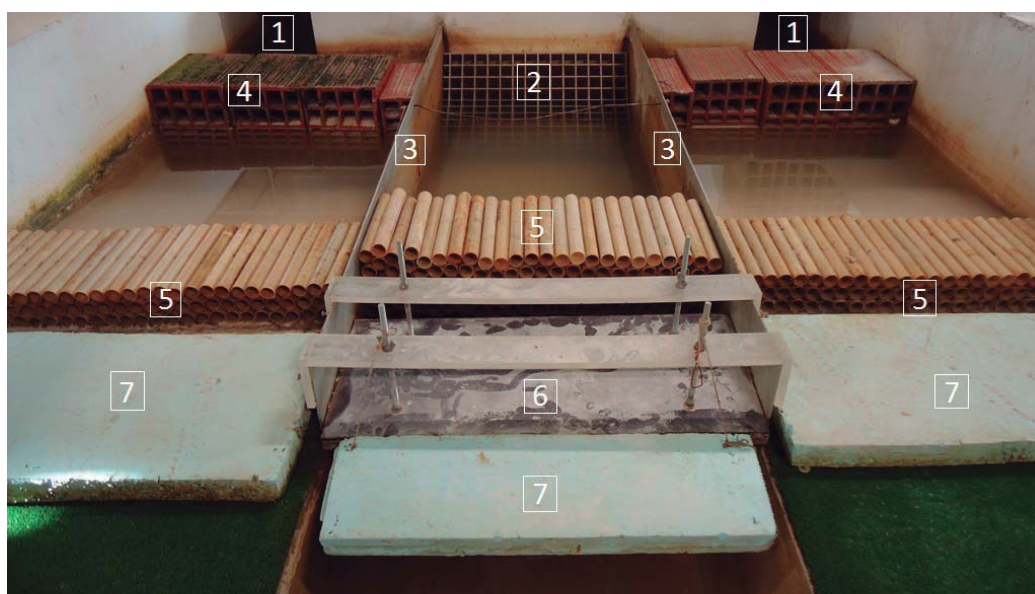
A jusante do canal existe um sistema de três comportas (8, *cf.* Figura 3.2) que regulam a altura de água, constituído por uma comporta geral e uma para cada leito de cheia. A comporta geral é basculante, altera principalmente a altura de água no leito principal e é regulável pelo exterior do canal. As comportas dos leitos de cheia são independentes uma da outra e são reguláveis por porcas e parafusos existentes

por baixo de cada comporta. Por estas comportas serem reguláveis pelo interior do canal é conveniente serem só alteradas quando não há escoamento.

O escoamento após transpor as comportas é conduzido por uma tubagem enterrada (9, *cf.* Figura 3.2) até ao reservatório subterrâneo (10, *cf.* Figura 3.2), a partir do qual a água é bombeada para o reservatório elevado. Obtém-se assim um circuito fechado, permitindo a alimentação constante e ininterrupta do canal.

Como o canal tem um comprimento relativamente pequeno, existe a possibilidade do equilíbrio não ser atingido. Para contornar este potencial problema montou-se a montante do canal uma contracção (6, *cf.* Figura 3.2), cujo objectivo é a estabilização do escoamento e redução da transferência de massa entre subsecções.

Nos leitos de cheia, esta contracção é conseguida através da colocação de tijolos cerâmicos furados de dimensões $30 \times 20 \times 11$ e de vários tubos de plástico empilhados, como mostra a Figura 3.3. No leito principal, colocou-se um rectângulo quadriculado imediatamente à saída do escoamento. Este sistema não só direcciona o escoamento como também provoca uma perda de carga considerável. De modo a minimizar a ondulação colocou-se ainda uma placa de poliestireno em cada leito de cheia e uma placa de contraplacado marítimo no leito principal. As placas de poliestireno dos leitos de cheia são presas de modo a só se deslocarem verticalmente, mediante a altura de água, e o contraplacado marítimo do leito principal é ajustável verticalmente através de parafusos.



1 - Entrada de água para os LC 3 - Chapa metálica de separação 4 - Tijolos cerâmicos 30x20x11 6 - Placa de contraplacado marítimo
2 - Entrada de água para o LP 5 - Tubos de plástico empilhados 7 - Placa de poliestireno

Figura 3.3: Sistema de estabilização do escoamento

Note-se que todas estas alterações efectuadas no canal seguiram as recomendações sugeridas por Bousmar *et al.* (2005).

A Figura 3.4 mostra o canal com secção composta, o sistema de bombagem do reservatório subterrâneo para o elevado, o descarregador de superfície do reservatório elevado e o sistema de comportas no final do canal.



(a) Vista geral do canal com secção composta



(b) Bombas



(c) Descarregador de superfície do reservatório elevado



(d) Sistema de comportas no fim do canal



(e) Regulação da comporta geral

Figura 3.4: Fotografias do canal e pormenores

3.3 Equipamentos de controlo e medição

A alimentação do leito principal e dos leitos de cheia do canal experimental é feita separadamente, como referido anteriormente. Assim, a quantidade de água, proveniente do reservatório elevado, que entra em cada leito é controlada através de dois medidores electromagnéticos de caudal, correntemente chamados de caudalímetros. Estes caudalímetros são equipamentos de medição volumétrica de água e possuem uma exactidão de $0,1 \text{ l/s}$. Por outro lado, o caudal é regulado por duas válvulas de seccionamento.

Os dois leitos de cheia são abastecidos pela mesma tubagem e, portanto, são controlados pelo mesmo medidor de caudal e válvula de seccionamento. A quantidade de água que abastece cada leito de cheia é a que aparece no visor do respectivo caudalímetro dividida equitativamente por cada um dos leitos. Todos estes elementos e características podem ser observados na Figura 3.5.



1 - Medidor de caudal dos leitos de cheia 3 - Medidor de caudal do leito principal
2 - Válvula de seccionamento dos leitos de cheia 4 - Válvula de seccionamento do leito principal

Figura 3.5: Equipamentos de controlo da alimentação do canal experimental

Longitudinalmente ao canal estão aparafusadas calhas sobre as quais se consegue deslocar uma plataforma que serve de apoio às medições, não só da velocidade do escoamento como também da altura de água, pois os equipamentos necessários para estas medições estão ambos fixados à plataforma. A velocidade do escoamento é medida através de um velocímetro e a altura de água com o auxílio de um hidrómetro, com nónio acoplado (*cf.* Figura 3.6). Ambos os equipamentos, apesar de estarem presos à plataforma, podem ser deslocados verticalmente e transversalmente, permitindo que as medições possam ser feitas em qualquer ponto do canal.



(a) Fixação dos hidrómetros e do Vectrino à plataforma



(b) Vectrino

Figura 3.6: Plataforma de medição

O velocímetro com o qual se fizerem as medições da velocidade do escoamento é denominado por *Vectrino Plus* e pertence à categoria dos *Doppler* acústicos (ADV). Este aparelho, quando colocado dentro de água, permite medir a sua velocidade instantânea nas três dimensões - longitudinal, transversal e vertical - através do efeito *Doppler*. Este *Vectrino* foi configurado com um *firmware* superior ao padrão, permitindo que a recolha de dados se faça até uma frequência de 200 *Hz*, em detrimento da máxima frequência de 25 *Hz* do *Vectrino* corrente. É por esta mais-valia denominado *Vectrino Plus*.

O sensor acústico do *Vectrino* tem cinco transdutores, um para transmitir e quatro para receber (cf. Figura 3.7). O aparelho utilizado tem uma sonda *sidelooking*, isto é, mede lateralmente, e o volume de amostragem localiza-se a cerca de 5 *cm* ao lado do sensor, de modo a fornecer medições não perturbadas. Este tipo de configuração da sonda tem como grande vantagem, em relação à configuração *standard downlooking*, o facto de permitir medições com alturas de escoamento pequenas.

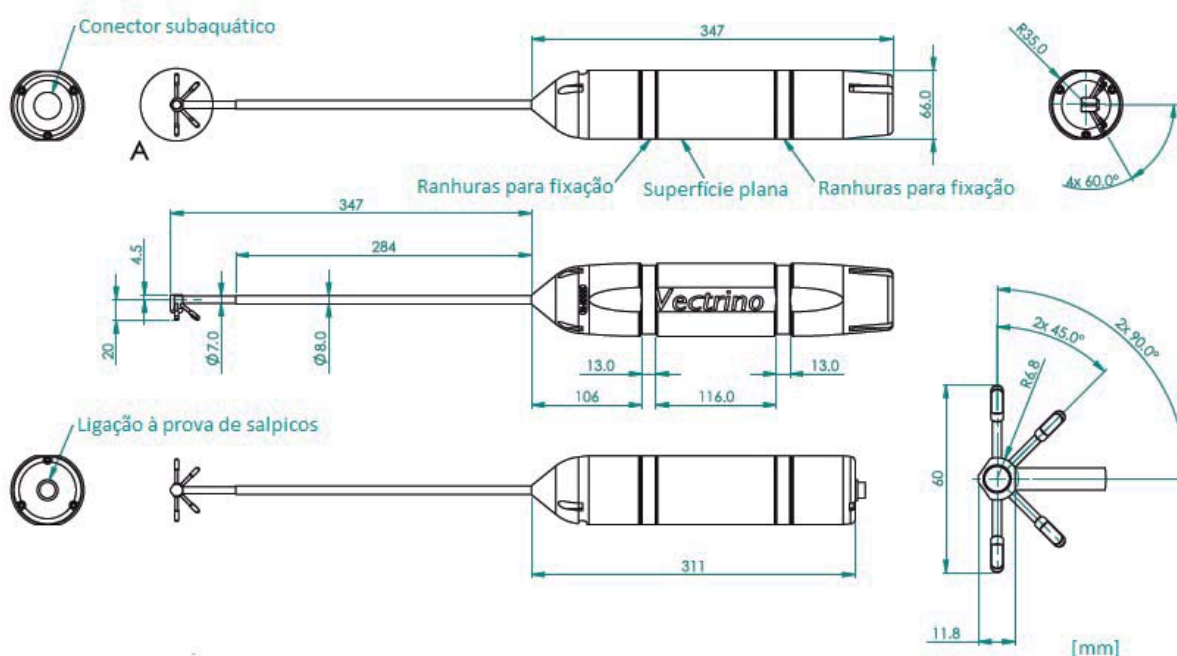
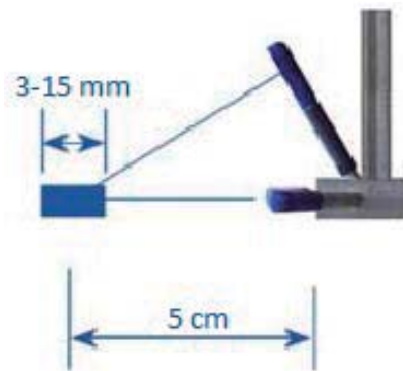


Figura 3.7: Pormenor construtivo do Vectrino (www.nortek.no)

Os velocímetros acústicos *Doppler* funcionam enviando uma curta onda de som a partir do elemento de transmissão. Por sua vez, este impulso é reflectido nas partículas suspensas na água e o eco é registado em cada um dos elementos receptores acústicos. Após o eco ser processado, os vectores de velocidade são gravados e transmitidos para um computador a elevadas frequências.

Como foi referido, a onda emitida pelo transdutor é reflectida nas partículas suspensas na água, uma vez que a onda não pode ser transmitida na água em si. Por esta razão e de modo a melhorar a qualidade das medições aumentou-se a concentração de partículas suspensas na água na zona do volume de amostragem, ou seja a 5 *cm* do *Vectrino* (cf. Figura 3.8). Correntemente dá-se o nome de *seeding* a esta concentração e neste estudo utilizou-se pó de sílica misturado com água. O pó de sílica adoptado tem como características principais uma densidade relativa de 2,65 e o tamanho médio das partículas, d_{50} , é 20 μm .

Figura 3.8: Volume de medição do *Vectrino*

O *seeding* foi introduzido no escoamento através de uma mangueira ligada a um reservatório a montante do canal onde era feita a mistura. Por sua vez, era possível deslocar a mangueira, transversalmente ao canal, de modo a alinhar a alimentação com o posicionamento de cada leitura (cf. Figura 3.9). Na realização desta dissertação assumiu-se que a velocidade a que as partículas se deslocam na água é a mesma do escoamento.



(a) Reservatório

(b) Exemplo de aplicação do *seeding* no leito de cheia esquerdoFigura 3.9: Introdução do *seeding*

Neste estudo, a adopção da rugosidade impossibilitou a medição das tensões de arrastamento. Isto deveu-se ao facto de não se ter tido acesso a um transdutor de pressão suficientemente sensível que conseguisse efectuar com êxito estas medições. A presente dissertação ressentiu-se da falta destas medições já que um dos efeitos da introdução da vegetação é o aumento da resistência junto ao fundo.

A tabela 3.1 sumariza os equipamentos utilizados durante a campanha experimental.

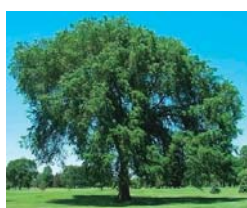
Tabela 3.1: Resumo dos equipamentos usados nos ensaios

Equipamento	Características	Tipo de medição
Hidrômetros	- Com nónio acoplado - Com ponta amovível - Precisão: $\pm 0,1 \text{ mm}$	Altura de água
Caudalímetros	- Marca: Altometer - Modelo: SC100AS - Precisão: $\pm 0,1 \text{ l/s}$	Caudal
<i>Vectrino Plus</i>	- Velocímetro de <i>Doppler</i> Acústico (ADV) - Medições de 3 minutos a uma frequência de 100 Hz - Distribuidor: Nortek AS - Precisão: $\pm 0,5 \%$ do valor medido	Velocidade

3.4 Procedimento experimental

3.4.1 Selecção dos elementos verticais

O objectivo desta dissertação prende-se com o estudo da influência de leitos de cheia rugosos e elementos verticais, na interface entre o leito principal e o leito de cheia, no escoamento em canais com secção composta. Surge portanto a necessidade de escolher estes elementos. A rugosidade nos leitos de cheia foi introduzida através da colocação, em todo o seu comprimento, de panos de relva sintética com aproximadamente 5 mm de espessura (cf. Massa, 2011). Relativamente aos elementos verticais, é necessário assegurar que a geometria e a configuração adoptadas sejam representativas da realidade. Deste modo, várias considerações devem ser tidas em conta, não apenas em relação ao elemento por si só, mas também à sua disposição no canal experimental. A vegetação ribeirinha mediterrânica é dominada por freixos (*Fraxinus angustifolia*), choupos (*Populus nigra*), amieiros (*Alnus glutinosa*) e salgueiros (*Salix atrocinerea*) (Ferreira *et al.*, 2005). A Figura 3.10 mostra exemplos destas árvores.



(a) Freixo



(b) Choupo



(c) Amieiro



(d) Salgueiro

Figura 3.10: Vegetação ribeirinha mediterrânica dominante

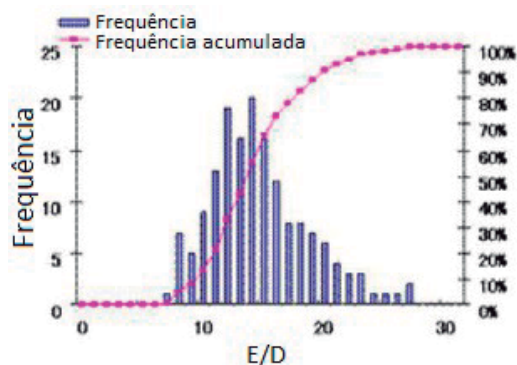
Após contacto com diversos fornecedores, o elemento artificial que melhor se ajusta à forma das árvores apresentadas na Figura 3.10 é uma árvore artificial com copa esférica. Analisando a relação geometria/preço optou-se pelo elemento mostrado na Figura 3.11, cujo diâmetro da copa é 9 cm e do tronco 6 mm.



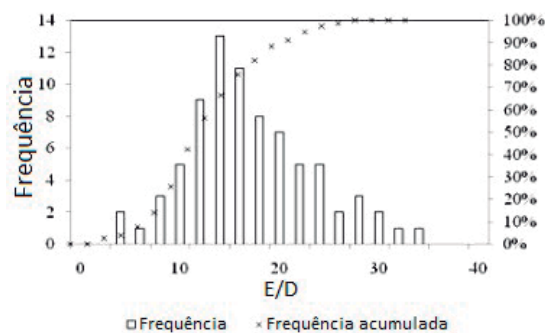
Figura 3.11: Elemento artificial utilizado para a modelação das árvores

Outro factor a considerar é a distribuição destes elementos no canal experimental. É necessário, por isso, escolher o comprimento de canal que terá árvores na interface e o espaçamento entre duas árvores consecutivas.

Espaçamentos entre 8 a 16 vezes o diâmetro do tronco das árvores mostraram ser representativos da realidade (Terrier *et al.*, 2010). Shiono *et al.* (2009) fizeram o levantamento do espaçamento entre árvores ao longo de três rios no Japão, obtendo os resultados apresentados na Figura 3.12(a). Terrier (2010) fez um levantamento semelhante num trecho do rio Tamisa, em Inglaterra, e obteve o gráfico da Figura 3.12(b). Este autor analisou ainda uma parte do rio Reno, em França, chegando a uma relação de espaçamento sobre o diâmetro de $E/D = 10$. Observando a Figura 3.12 pode-se constatar que a relação mais frequente é $E/D = 14$, sendo que relações de E/D entre 12 e 16 apresentam-se com frequências bastante elevadas.



(a) Levantamento realizado em três rios do Japão (adaptada de Shiono *et al.*, 2009)



(b) Levantamento feito no rio Tamisa, Inglaterra (adaptada de Terrier, 2010)

Figura 3.12: Relação entre o espaçamento entre árvores, E , e o diâmetro do seu tronco, D

Para o caso em estudo, optou-se por colocar os elementos verticais numa extensão de 6 m e com um espaçamento entre troncos igual ao diâmetro da copa, isto é, $E = 9 \text{ cm}$. O tronco do elemento artificial adoptado tem 6 mm de diâmetro, obtendo-se assim uma relação $E/D = 15$ que é consistente com os resultados atrás apresentados.

Como referido, o levantamento da vegetação ao longo dos rios foi realizado em três países distintos (Japão, Inglaterra e França) e os resultados parecem ser coerentes, apesar das diferenças geográficas dos locais analisados (Terrier, 2010). Por conseguinte, as dimensões do elemento artificial e o espaçamento adoptados nesta dissertação enquadram-se bem com a realidade. A Figura 3.13 mostra a configuração final adoptada, onde a disposição dos elementos verticais totaliza 136 árvores, 68 em cada interface entre o leito principal e o leito de cheia.

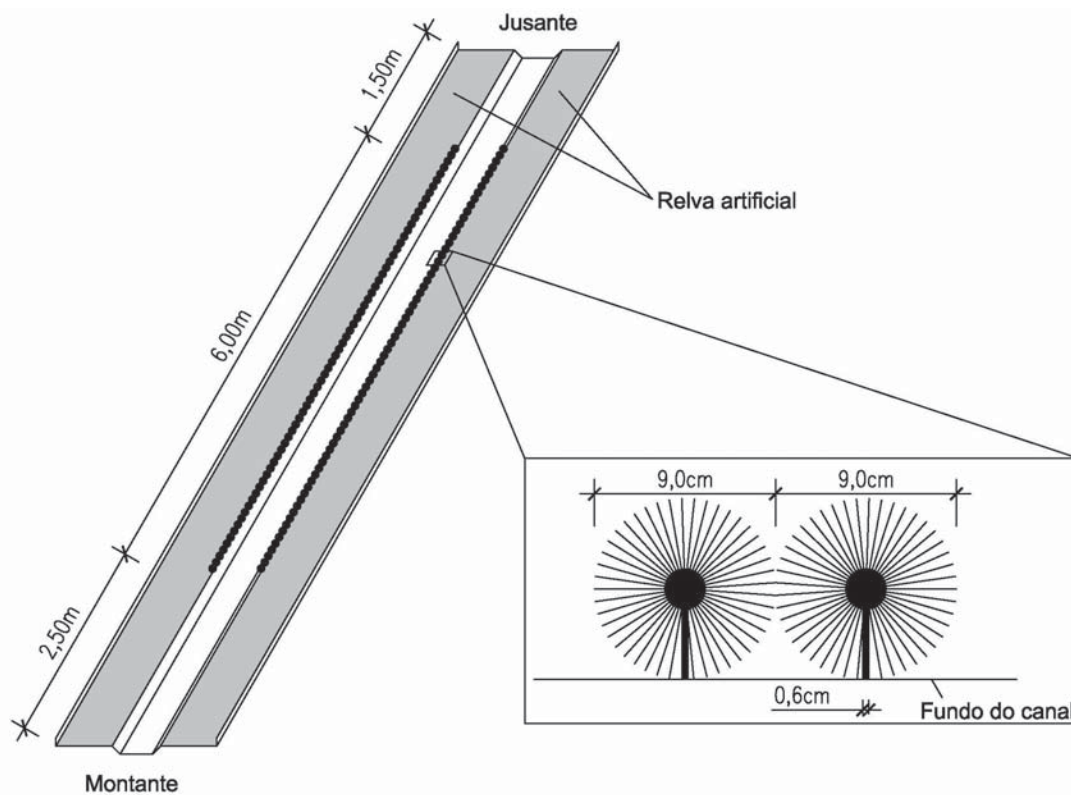


Figura 3.13: Posicionamento dos elementos verticais no canal experimental

3.4.2 Estabelecimento do regime uniforme

Os ensaios efectuados no âmbito deste estudo foram levados a cabo sob a condição de escoamento em regime uniforme, apesar de este não ser observado com a frequência na natureza. Contudo, esta aproximação permite uma análise mais simplificada dos resultados e uma generalização das conclusões para regimes uniformes obtidos em configurações diferentes. Com esta consideração espera-se que as alturas de água, velocidades e distribuição de caudais se mantenham constantes em toda a extensão do canal experimental.

Apesar de se tratar de uma condição de escoamento simplificada, o estabelecimento de regime uniforme é um processo iterativo e requer a calibração do canal. Resumidamente, esta calibração consiste na imposição de uma determinada repartição de caudais a montante. Após a estabilização dos caudais, medem-se as alturas de água a 4 m (X4000) e a 7,5 m (X7500) do início do canal, no leito principal e no leito de cheia por meio de hidrómetros. Seguidamente alteram-se sucessivamente os níveis das comportas no fim do canal até as alturas nos dois leitos se igualem entre si e também entre X4000 e X7500. De modo a minimizar possíveis erros de leitura, são medidas três alturas de água em cada leito, considerando-se a média desses pontos.

Atingida a uniformidade do nível da água, mede-se a velocidade do escoamento nas secções X4000 e X7500, por se considerar que a primeira está suficientemente afastada da alimentação do canal para não sofrer influência desta e que a segunda está suficientemente afastada da saída (comportas) para não sofrer influência desta.

Integrando as velocidades na área obtém-se o valor do caudal que efectivamente é escoado no leito principal e nos leitos de cheia nas secções calculadas. Se os caudais medidos a X4000 e a X7500 forem iguais ao imposto a montante, então a condição de escoamento em regime uniforme está verificada. Caso contrário, o novo caudal imposto passa a ser o calculado na secção X7500 e repete-se todo o procedimento desde a medição das alturas de água até se estabelecer um equilíbrio na repartição de caudais em toda a extensão do canal.

Na realização deste processo, admitiu-se uma tolerância de erro de 1 mm para os níveis da água e de 0,1 l/s para os caudais.

De um modo geral, este foi o sistema adoptado para o estabelecimento de regime uniforme. Contudo, para a configuração de fundo rugoso com elementos verticais surgiram vários problemas que fizeram com que se acrescentasse mais um passo ao procedimento de calibração do canal para regime uniforme. A Figura 3.14 apresenta uma esquematização do procedimento adoptado.

Um dos principais contratemplos encontrado foi o levantamento da relva que cobria os leitos de cheia. Este levantamento não foi pontual, acontecendo em vários pontos ao longo do canal e a sua existência só foi visível aquando do estabelecimento de regime uniforme para a altura relativa mais pequena, por a altura de água ser menor. Este problema foi resolvido através da realização de cortes longitudinais na relva, de modo a eliminar o ar, que se acumulava por baixo do tapete de relva.

No entanto, a razão de ser ter acrescentado mais um passo ao processo de calibração não foi o levantamento da relva. No cálculo dos caudais em cada secção verificou-se que o caudal imposto era igual ao caudal em X7500, mas substancialmente mais pequeno do que o da secção X4000. Estava-se então na presença de uma grande transferência de massa entre a saída do escoamento e a secção a 4 m. Atribuiu-se esta transferência de massa ao facto de os elementos verticais não começarem no início do canal, mas sim a 2,5 m, e portanto o equilíbrio ainda não estava atingido na secção medida a montante.

Para contornar este problema, considerou-se que se o caudal imposto fosse igual ao caudal calculado a 6 m (X6000) e a 7,5 m (X7500), então o regime uniforme estava estabelecido, pelo menos na secção onde foram efectuadas as medições em X7700. Estas secções estão esquematizadas na Figura 3.15.

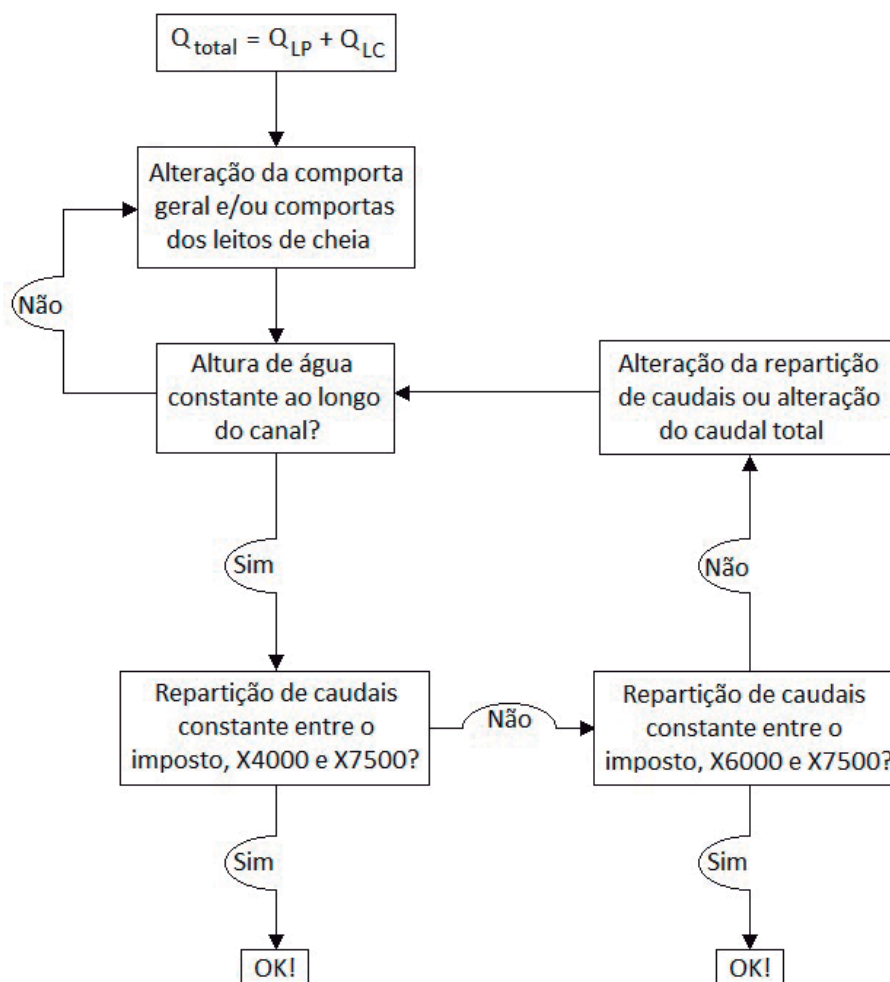


Figura 3.14: Processo adoptado para o estabelecimento de regime uniforme

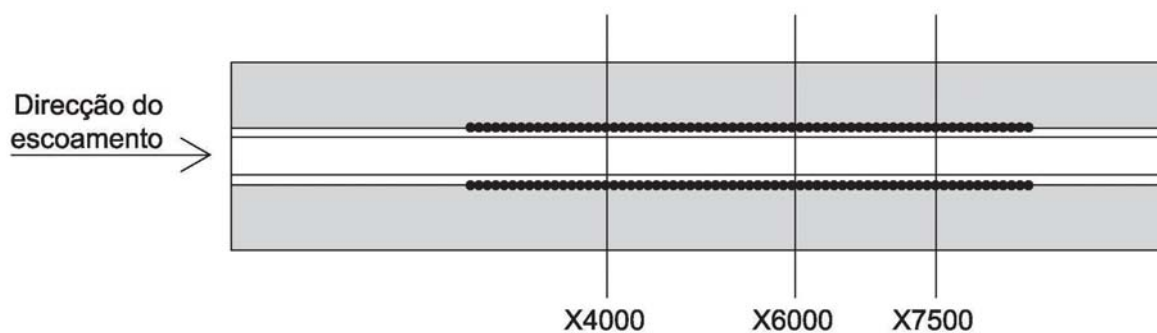


Figura 3.15: Secções do canal de referência (vista do canal em planta)

3.4.3 Metodologia de medição

A realização dos ensaios implicou a definição prévia das secções a medir. Para tal é necessário ter em consideração o facto de o canal ter dimensões reduzidas, de o escoamento demorar a estabilizar e de só existirem árvores em 6 m do canal, para a configuração de fundo rugoso com elementos verticais. Assim, para este caso foi apenas medida a secção mais a jusante, em aproximadamente X7700. Contudo, para estudar mais detalhadamente a influência que os elementos verticais têm no escoamento, optou-se por fazer três medições entre duas árvores consecutivas: (a) 1 cm após a árvore mais a montante; (b) centro entre duas árvores; (c) 1 cm antes da árvore mais a jusante (cf. Figura 3.16). Estas medições tomaram o nome de Montante, Centro e Jusante respectivamente.

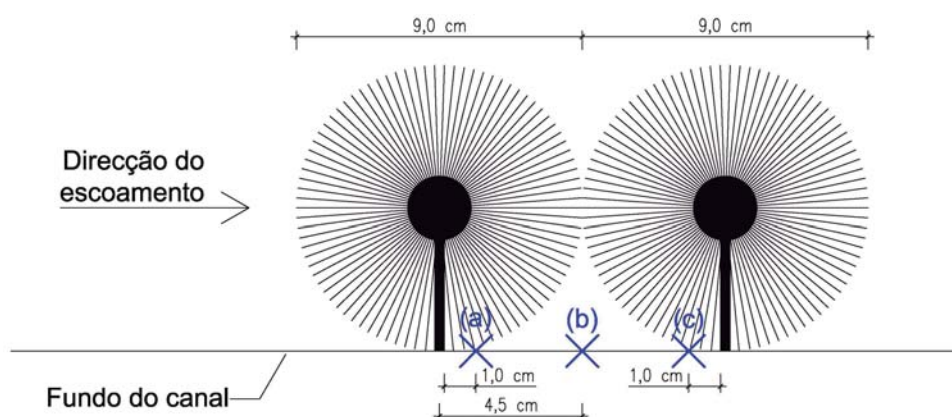


Figura 3.16: Esquematização das secções medidas: (a) medição a montante (X7705); (b) medição ao centro (X7737); (c) medição a jusante (X7769)

Estando definidas as secções a medir, é necessário estabelecer uma malha de medição (cf. Figura 3.17). Por o canal ser simétrico só se mediu meia secção.

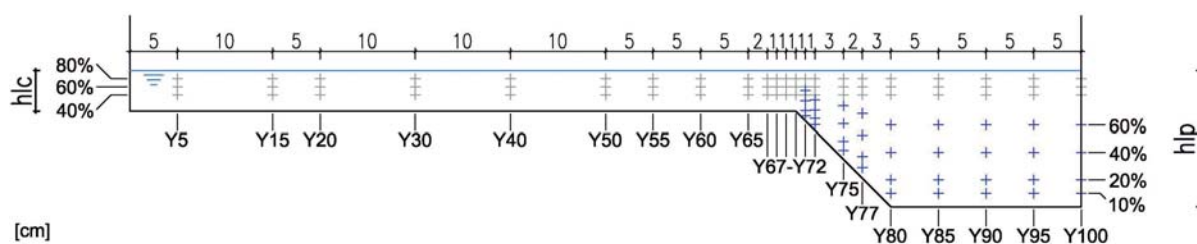


Figura 3.17: Malha de medição

A malha de medição é constituída por 22 posições no eixo do Y. Em Z tem 3 e 7 alturas no leito de cheia e leito principal, respectivamente. As 3 alturas medidas no leito de cheia correspondem a percentagens da altura de água deste leito - 40%, 60% e 80% - e estendem-se até ao leito principal. Estes pontos são representados na Figura 3.17 pelas cruzes cinzentas. No leito principal, além destas 3 alturas junto à superfície livre, são medidas mais 4 alturas correspondentes a 10%, 20%, 40% e 60% da altura de água do leito principal. Estes pontos são representados na Figura 3.17 pelas cruzes azuis. Deste modo, cada

secção é caracterizada através da medição de 102 pontos. Cada uma destas medições teve a duração de 3 minutos.

Medir as posições Y65, Y67 e Y68 na secção X7700, a montante e a jusante, implicou rodar o *Vectrino* 180° segundo o eixo vertical, devido à interferência das hastes receptoras do velocímetro com os elementos verticais. Em consequência, teve de se inverter o sinal dos dados destes três pontos, já que com a troca da posição do *Vectrino*, o sentido dos eixos também muda. A Figura 3.18 mostra a direcção e o sentido positivo dos eixos adoptados para o canal experimental e também os do velocímetro. A inversão do *Vectrino* e a alteração dos sinais tornou a medição de cada secção num processo ainda mais moroso.

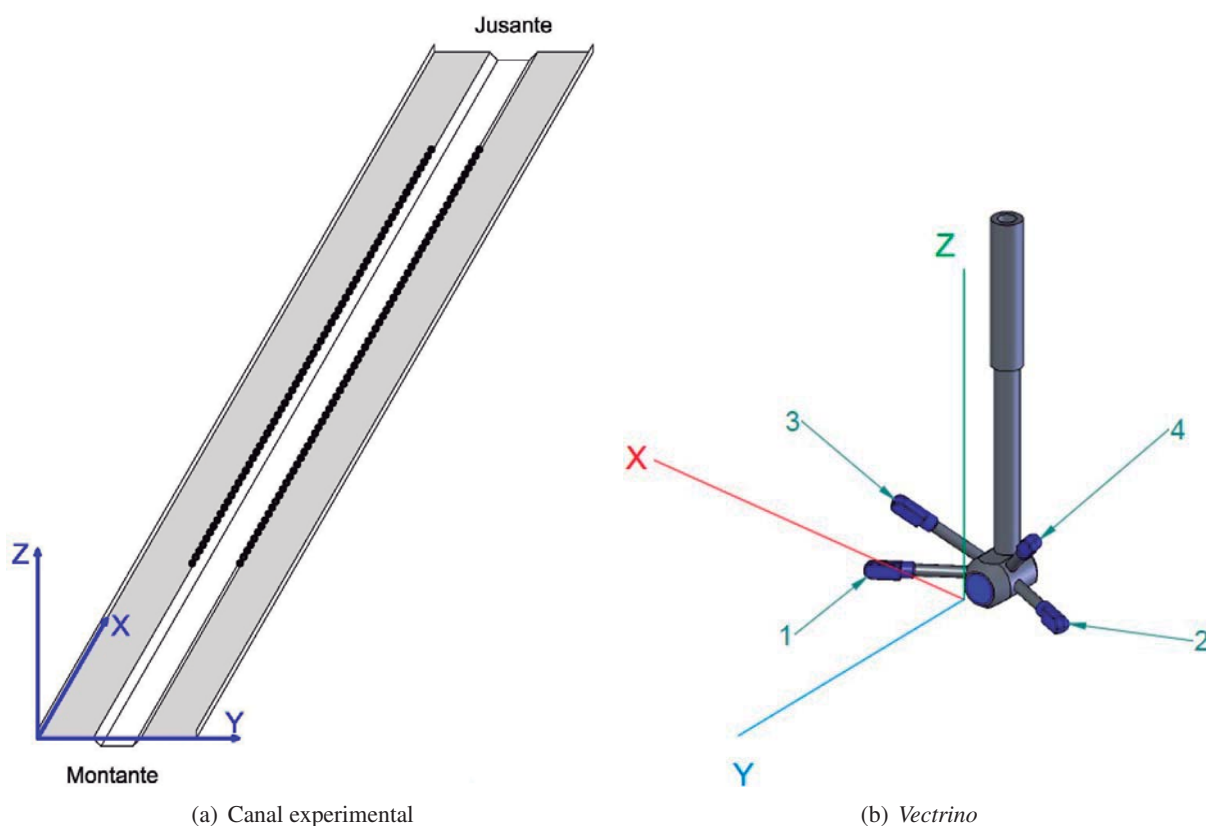


Figura 3.18: Direcção e sentido positivo dos eixos

Capítulo 4

Caracterização dos ensaios e processamento de dados

4.1 Caracterização dos ensaios

Para uma definição mais completa do escoamento, além de se apresentarem os resultados para leitos de cheia rugosos com elementos verticais na interface entre o leito principal e o leito de cheia, faz-se também a comparação destes resultados com o correspondente para fundo liso e fundo rugoso. Na medida em que os ensaios efectuados no Canal Veiga da Cunha, no LNEC, correspondem a um trabalho em progressão, alguns destes dados já tinham sido medidos antes do início deste trabalho. A tabela 4.1 resume os ensaios realizados que serão apresentados no âmbito deste estudo (✓) e identifica os que já tinham sido realizados por Duarte (2011).

Tabela 4.1: Resumo dos ensaios realizados cujos resultados serão apresentados

h_r	Fundo liso	Fundo rugoso	Fundo rugoso com árvores		
			Medição a montante	Medição ao centro	Medição a jusante
0,15	✓	Duarte (2011)	✓	✓	✓
0,20	Duarte (2011)	✓	✓	✓	✓
0,30	-	Duarte (2011)	✓	✓	✓

A colocação das 136 árvores teve como consequência directa a realização de 136 furos no canal experimental. Como tal, mesmo que se retirem as árvores e se tapem os furos, o canal ficará diferente, tornando a comparação com outros dados recolhidos após a remoção das árvores pouco rigorosa. Por esta razão, antes de proceder à colocação das árvores, foi necessário efectuar alguns ensaios adicionais para fundo liso e fundo rugoso, cujos resultados, por não fazerem parte do âmbito desta dissertação, não serão apresentados. Destas medições destaca-se a caracterização da secção X1100 (1, 10 m do início do canal) para ambos os fundos e em regime uniforme e não uniforme.

A Figura 4.1 mostra o canal experimental com os diferentes tipos de fundo utilizados no decorrer deste trabalho.

Esta dissertação tem como objectivo investigar experimentalmente o modo como a rugosidade dos leitos de cheia e os elementos verticais afectam a estrutura do escoamento em canais com secção composta.

A influência da rugosidade dos leitos de cheia será analisada comparando resultados obtidos com fundo liso e fundo rugoso. A influência dos elementos verticais será avaliada comparando resultados obtidos com fundo rugoso sem e com elementos verticais na interface.



(a) Fundo liso



(b) Leitos de cheia rugosos



(c) Leitos de cheia rugosos com árvores

Figura 4.1: Fotografias do canal experimental com os diferentes fundos estudados

As condições hidráulicas para os três casos estudados estão detalhadas nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Da análise da Tabela 4.3 conclui-se que os números de Reynolds são suficientemente elevados para que possam ser desprezados os efeitos da viscosidade.

O número de Froude, também conhecido por factor cinético, representa a relação entre a velocidade do escoamento, U , e a velocidade de propagação das pequenas perturbações, \sqrt{gh} . Esta velocidade chama-se velocidade crítica. Assim, se a velocidade média da corrente for superior a este valor, ou seja,

se o número de Froude for inferior a 1, as pequenas perturbações propagam-se para montante e o regime diz-se lento ou fluvial (Lencastre, 1996). Da análise da Tabela 4.3 verifica-se que o número de Froude é sempre menor que 1.

Tabela 4.2: Condições hidráulicas - Parte 1

Nome	Rugosidade do leito de cheia	Altura de água do leito principal (m)	Altura relativa (-)	Caudal do leito principal (l/s)	Caudal do leito de cheia (l/s)	Caudal total (l/s)
HR015L	Liso	0, 1172	0, 15	38, 2	6, 6	44, 8
HR020L	Liso	0, 1240	0, 19	42, 2	11, 2	53, 4
HR015R	Rugoso	0, 1192	0, 15	35, 1	3, 7	38, 8
HR020R	Rugoso	0, 1284	0, 21	39, 3	7, 3	46, 6
HR030R	Rugoso	0, 1450	0, 31	42, 3	16, 6	58, 9
HR015RA	Rugoso com árvores	0, 1173	0, 15	34, 9	1, 6	36, 5
HR020RA	Rugoso com árvores	0, 1244	0, 20	36, 1	3, 8	39, 9
HR030RA	Rugoso com árvores	0, 1428	0, 30	39, 3	11, 7	51, 0

Tabela 4.3: Condições hidráulicas - Parte 2

Nome	Velocidade do leito principal (m/s)	Velocidade do leito de cheia (m/s)	Número de Reynolds do leito principal ($\times 10^5$)	Número de Reynolds do leito de cheia ($\times 10^5$)	Número de Froude do leito principal (-)	Número de Froude do leito de cheia (-)
HR015L	0, 633	0, 274	2, 22	0, 18	0, 681	0, 676
HR020L	0, 655	0, 333	2, 45	0, 31	0, 682	0, 699
HR015R	0, 571	0, 138	2, 04	0, 10	0, 607	0, 322
HR020R	0, 586	0, 184	2, 28	0, 20	0, 598	0, 355
HR030R	0, 549	0, 263	2, 45	0, 44	0, 523	0, 409
HR015RA	0, 578	0, 066	2, 02	0, 04	0, 621	0, 162
HR020RA	0, 558	0, 111	2, 09	0, 10	0, 580	0, 231
HR030RA	0, 519	0, 195	2, 28	0, 31	0, 498	0, 311

$$\text{Número de Reynolds} - Re_i = \frac{4R_i U_i}{\nu}$$

$$\text{Número de Froude} - Fr_i = \frac{U_i}{\sqrt{gh_i}}$$

Pinto (2010) estabeleceu um valor de viscosidade cinemática para o caso em estudo de $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, sendo este o valor utilizado nesta dissertação.

4.2 Filtragem dos dados das velocidades e determinação das tensões de Reynolds

Os ADV's, apesar de se terem tornado num instrumento privilegiado para a medição de velocidades, acarretam algumas desvantagens. A principal é a existência de picos causados pelo próprio efeito *Doppler*, ou seja, quando a mudança de fase entre a saída e a entrada do impulso se encontra fora do

intervalo -180° e $+180^\circ$, causa um pico na medição. Tal situação pode ocorrer quando a velocidade do escoamento excede o intervalo predefinido ou quando existe contaminação de impulsos anteriores reflectidos através de superfícies com geometrias complexas (Goring e Nikora, 2002).

Goring e Nikora (2002) desenvolveram um método (*Phase-Space Thresholding Method*) para a eliminação dos picos, constituído por duas etapas: detectar o pico e substituir o pico. Este método, que mostrou funcionar correctamente, é baseado em três conceitos: (1) a diferenciação de um sinal aumenta as componentes de elevada frequência, (2) o máximo esperado de uma sequência de valores aleatórios é dado pelo chamado parâmetro Universal, λ_U , e (3) a nuvem de dados no espaço tridimensional é o conjunto dos dados bons. Estes conceitos são usados para construir uma elipsóide no espaço tridimensional, em que os pontos que se encontram fora da elipsóide são considerados picos e os que estão dentro são definidos pelo critério Universal.

O método sugerido por estes autores é iterativo e contém os seguintes passos:

1. Calcular a primeira e a segunda derivadas a partir de:

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

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

2. Calcular o desvio-padrão das três variáveis, σ_u , $\sigma_{\Delta u}$ e $\sigma_{\Delta^2 u}$ e depois o máximo esperado usando o critério Universal dado por:

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

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

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

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

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

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

5. Para cada projecção no espaço, identificar os pontos que estão fora da elipse e substituí-los.

em que: u_i é a velocidade instantânea; Δu_i é a primeira derivada de u_i ; $\Delta^2 u_i$ é a segunda derivada de u_i ; λ_U é o parâmetro Universal; $\hat{\sigma}$ é o desvio padrão estimado; n é o número da amostra; θ é o ângulo de rotação do eixo principal de $\Delta^2 u_i$ versus u_i ; σ_u , $\sigma_{\Delta u}$ e $\sigma_{\Delta^2 u}$ são os desvios padrão de u_i , Δu_i e $\Delta^2 u_i$, respectivamente; a e b são os eixos maior e menor, respectivamente, da projecção da elipsóide no plano $\Delta^2 u_i$ versus u_i .

Em cada iteração, a substituição dos picos reduz os desvios-padrão calculados no Passo 2 e, assim, o tamanho da elipsóide também diminui até a substituição dos picos deixar de ter efeito.

A Figura 4.2 mostra um exemplo de aplicação do método *Phase-Space*. A diferença entre os gráficos com os dados contaminados (a) e com os dados bons (b), após a filtragem, é notável. Enquanto que na Figura 4.2(a) existe um grande número de pontos fora da elipsóide e os histogramas apresentam picos secundários, na Figura 4.2(b) quase a totalidade dos dados está contida na elipsóide.

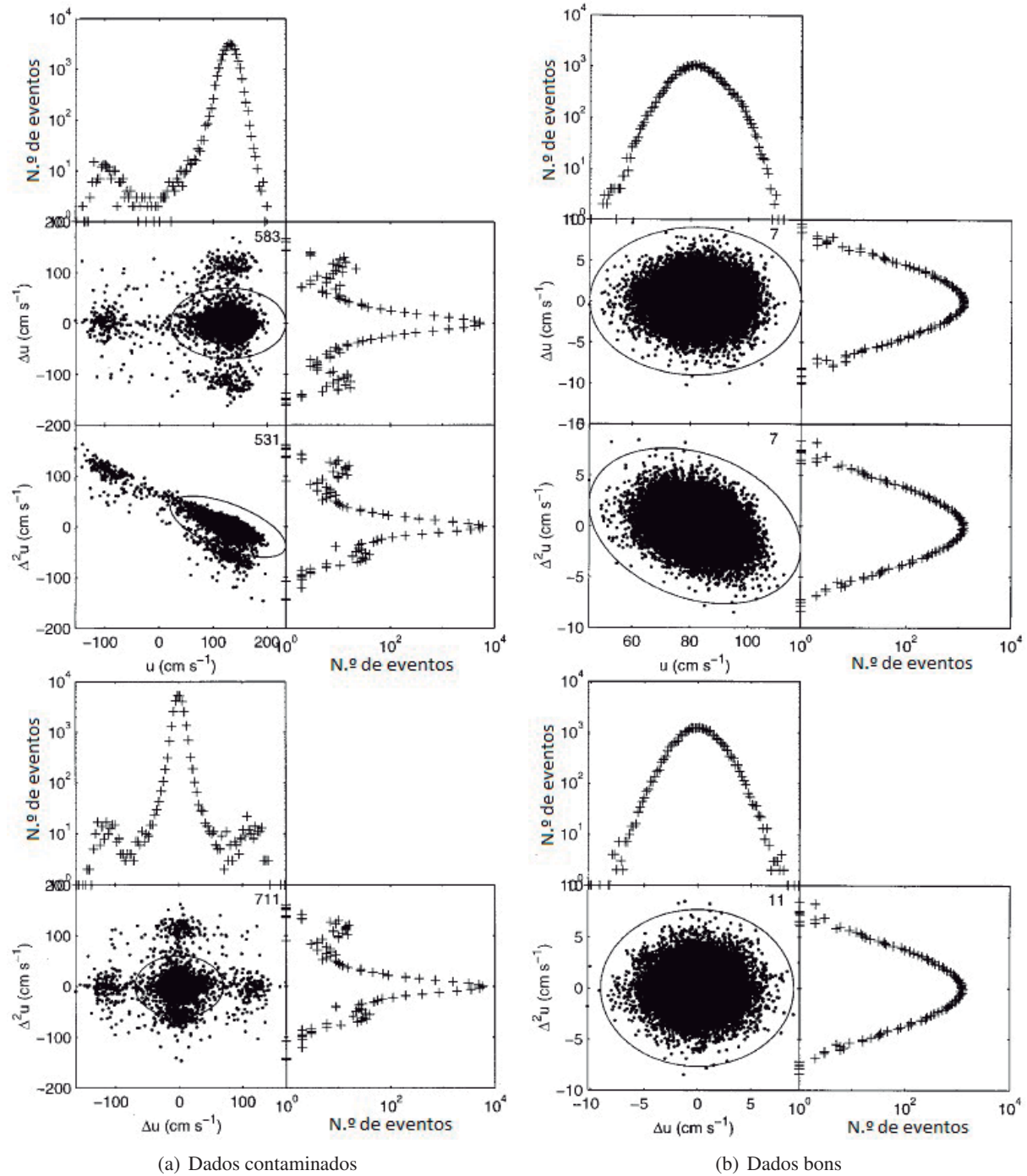


Figura 4.2: Gráficos *Phase-Space* (o número de picos detectados está listado no canto superior direito de cada gráfico *Phase-Space*) (adaptada de Goring e Nikora, 2002)

Independentemente do modo como a elipse é construída, um método que seja independente dos próprios picos é preferível. O algoritmo de filtragem de dados apresentado por Goring e Nikora (2002) recorre à média e ao desvio padrão e Rousseeuw (1998) mostrou que ambos são muito sensíveis a picos (Wahl, 2002).

Um algoritmo alternativo de filtragem de dados, baseado no método acima descrito, foi desenvolvido por Wahl (2002) e incorporado no programa *WinADV*, um *software* usado para o processamento e análise de dados ADV.

O algoritmo modificado detecta os picos como o sugerido por Goring e Nikora (2002), no entanto em vez de estes serem substituídos, o programa elimina-os. Em consequência, o comprimento do registo diminui, contudo esta estratégia é satisfatória já que para este estudo a estrutura do sinal não é preponderante.

A medição em cada ponto teve a duração de cerca de 3 minutos, a uma frequência de 100 *Hz*. Estas características, inseridas no *software* próprio do *Vectrino*, englobam um total de aproximadamente 17600 amostras.

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram a série temporal da velocidade longitudinal, para um ponto situado no centro do leito principal (Y100) e a 20% da altura de água, para as três alturas relativas estudadas na configuração com elementos verticais, antes e depois da aplicação do filtro do *WinADV* (Goring e Nikora, 2002, modificado por Wahl, 2002). A Tabela 4.4 apresenta os resultados da aplicação do filtro para os mesmos três pontos mencionados.

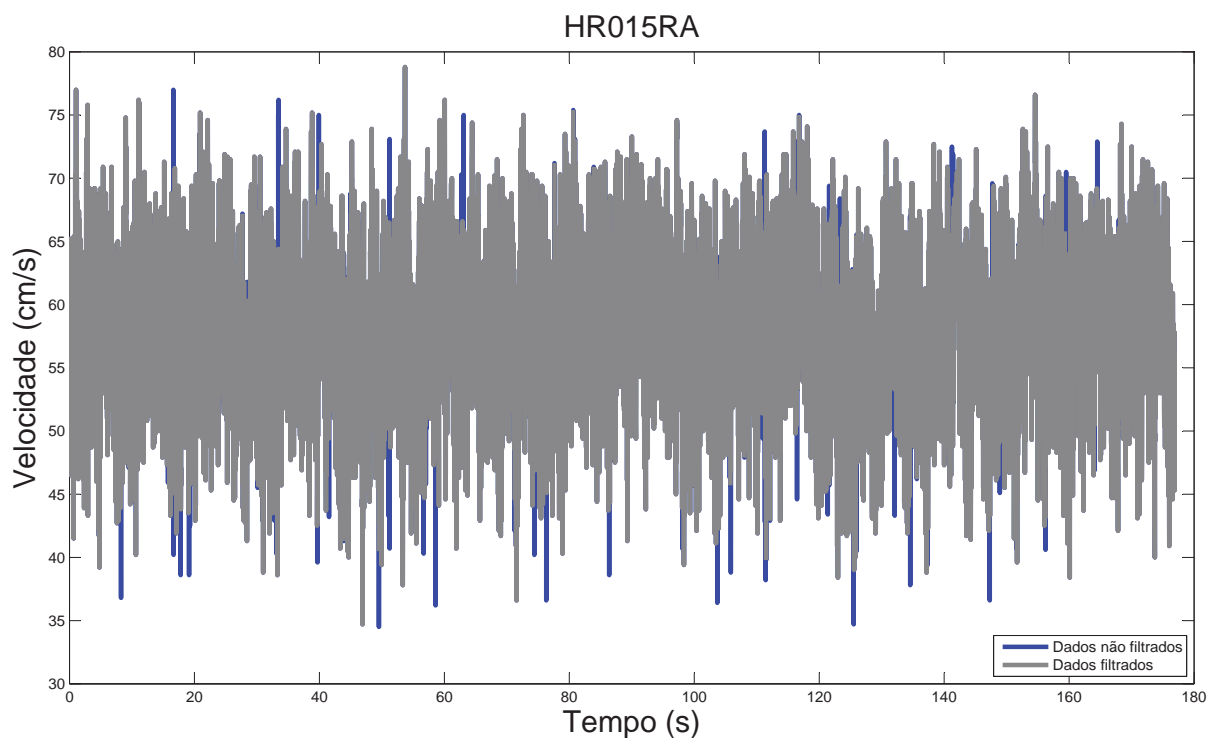


Figura 4.3: Aplicação do filtro do *WinADV* num ponto no centro do leito principal e a 20% da altura de água, para $h_r = 0, 15$ na configuração com elementos verticais

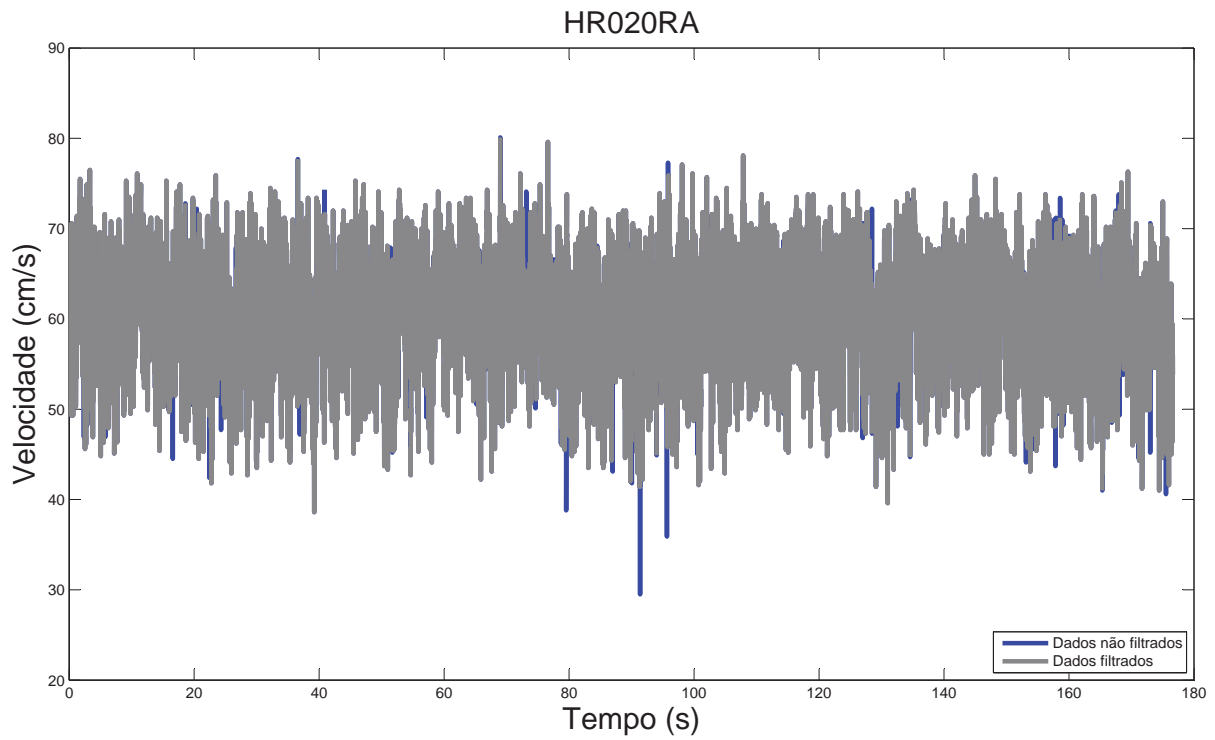


Figura 4.4: Aplicação do filtro do *WinADV* num ponto no centro do leito principal e a 20% da altura de água, para $h_r = 0,20$ na configuração com elementos verticais

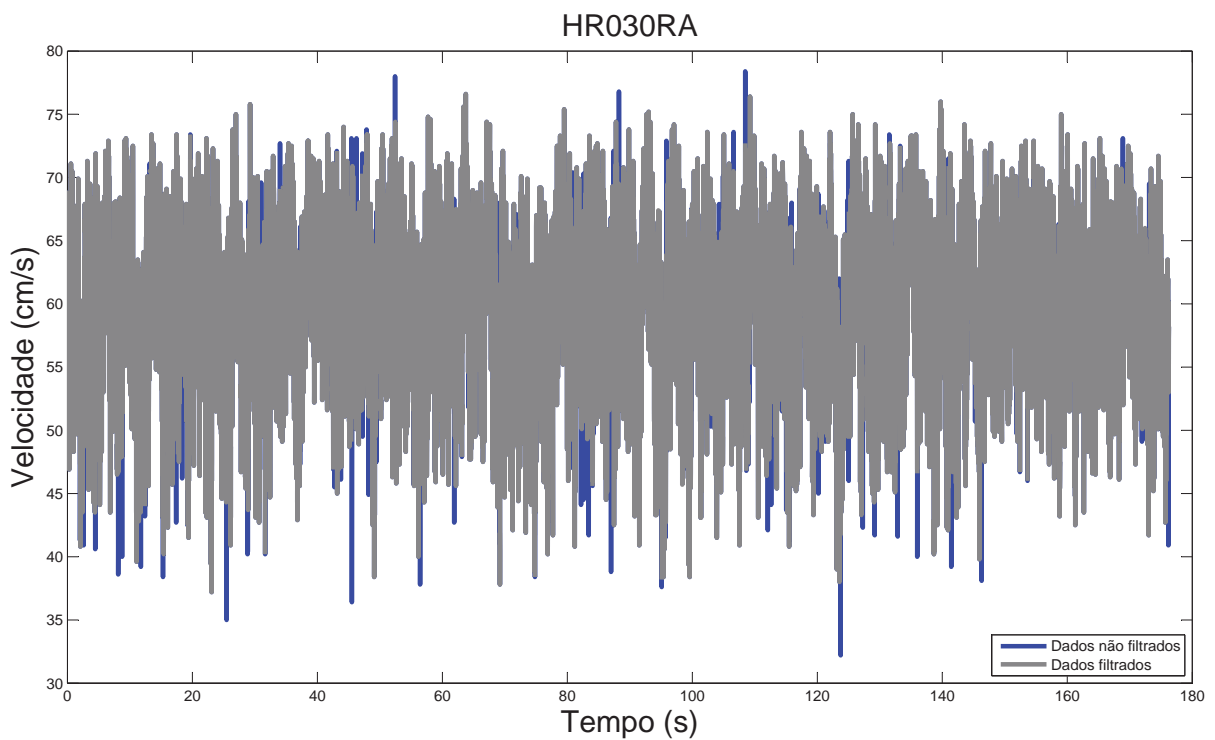


Figura 4.5: Aplicação do filtro do *WinADV* num ponto no centro do leito principal e a 20% da altura de água, para $h_r = 0,30$ na configuração com elementos verticais

Tabela 4.4: Resultados da aplicação do filtro do *WinADV*

h_r	N.º de amostras	N.º de dados bons	% de dados bons
0,15	17691	17425	98,50
0,20	17662	17412	98,58
0,30	17626	17258	97,91

Todos os dados processados foram analisados e apresentaram percentagens de dados bons idênticas às da Tabela 4.4. Pode-se, assim, concluir que o método usado para a filtragem dos dados deste estudo é adequado.

Destes "bons resultados" são excepção quatro pontos na interface, medidos a 80% da altura do leito de cheia, para $h_r = 0,15$. A explicação para tal e a respectiva solução é apresentada mais à frente neste texto.

Além de medirem velocidades, os ADV's também fornecem dados de turbulência, permitindo a determinação das tensões de Reynolds.

Os valores das tensões de Reynolds τ_{xy} foram obtidos através da equação:

$$\tau_{xy} = -\rho(\overline{U' \times V'}) \quad (4.7)$$

em que: ρ é a massa volúmica da água, U' e V' são as componentes de flutuação da velocidade longitudinal e transversal, respectivamente.

Os valores das tensões de Reynolds τ_{xz} foram obtidos através da equação:

$$\tau_{xz} = -\rho(\overline{U' \times W'}) \quad (4.8)$$

em que: ρ é a massa volúmica da água, U' e W' são as componentes de flutuação da velocidade longitudinal e vertical, respectivamente.

Neste estudo só se apresentam as tensões verticais τ_{xz} no leito principal, na medida em que, no leito de cheia para as alturas de água estudadas, as hastes do *Vectrino* ficam de fora durante as medições e portanto não se consegue medir correctamente a velocidade vertical.

4.3 Integração dos dados das velocidades

De modo a assegurar a conservação da massa ao longo do canal, é necessário calcular o caudal que efectivamente é escoado no leito principal e nos leitos de cheia. Para tal, recorre-se ao método de integração dos dados das velocidades, descrito por Pinto (2010). Este método baseia-se no princípio de que num dado sistema não existe destruição nem criação de matéria, ou seja, a massa de fluido que entra no canal tem de ser igual à que sai, assegurando, assim, a conservação da massa ao longo do canal.

Seja δs um troço do canal, suficientemente pequeno, em que a variação ΔS da área da secção recta seja desprezável entre as secções rectas B e C (*cf.* Figura 4.6), geralmente em pontos intermédios da malha considerada, e $(\Delta S)\delta s$ a porção de fluido nela contida. Se o fluido, inicialmente situado nos planos B e

C, atravessar o plano C num intervalo de tempo δt , então a taxa à qual o volume de fluido passa por C é $(\Delta S)\delta s/\delta t$. Como $\delta s/\delta t$ é a velocidade linear u no ponto considerado, o caudal volumétrico que passa nesse plano é $(\Delta S)u$.

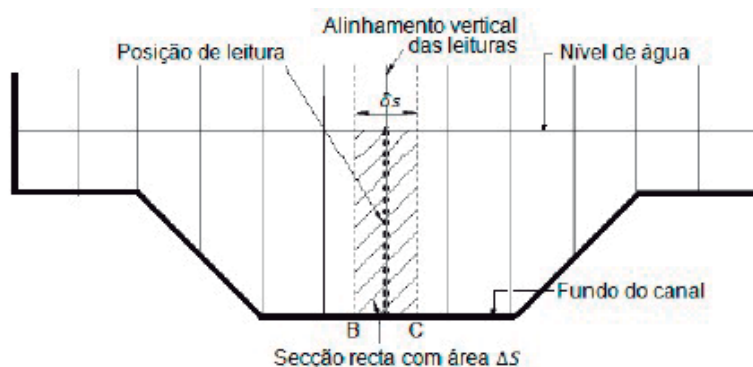


Figura 4.6: Esquemática da integração realizada para o cálculo do caudal escoado em determinada secção (retirada de Massa, 2011)

O caudal volumétrico, Q , obtém-se através do produto da velocidade média no tempo, \bar{u} , em cada posição da malha de medição, pela sua área de influência, S , conforme mostra a Equação 4.9:

$$Q = \int u \, dS = \bar{u}S \quad (4.9)$$

Dividindo a totalidade da secção do canal em segmentos verticais e fazendo o somatório de todos os caudais de cada área, obtém-se o caudal total que atravessa cada secção (Massey, 2002).

4.4 Verificação da consistência global dos dados das velocidades

Os caudais mostrados na Tabela 4.2 são os que asseguram a condição de escoamento em regime uniforme e foram calculados através da integração das velocidades medidas pela sua área de influência, de acordo com o descrito na secção anterior. Nas Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 estão indicados estes caudais, para as três configurações estudadas, respectivos factores de correcção e a diferença percentual entre caudais.

O factor de correcção é o rácio entre o caudal imposto, controlado pelos caudalímetros, e o caudal calculado através da integração das medições pontuais. Este factor de correcção é utilizado para corrigir todos os dados da velocidade com o objectivo de garantir a conservação da massa ao longo do canal.

Tabela 4.5: Erro entre o caudal calculado e o caudal imposto, ξ - fundo liso

Altura relativa (-)	Caudal calculado, Q_c (l/s)	Caudal imposto, Q_i (l/s)	Factor de corecção (-)	Diferença entre caudais, ξ (%)
0,15	43,9	44,8	1,021	2,09
0,20	51,4	53,4	1,039	3,71

Tabela 4.6: Erro entre o caudal calculado e o caudal imposto, ξ - fundo rugoso

Altura relativa (-)	Caudal calculado, Q_c (l/s)	Caudal imposto, Q_i (l/s)	Factor de correcção (-)	Diferença entre caudais, ξ (%)
0,15	38,1	38,8	1,019	1,86
0,20	44,4	46,6	1,050	4,72
0,30	59,4	58,9	0,991	-0,89

Tabela 4.7: Erro entre o caudal calculado e o caudal imposto, ξ - fundo rugoso com elementos verticais

Altura relativa (-)	Posição da medição	Caudal calculado, Q_c (l/s)	Caudal imposto, Q_i (l/s)	Factor de correcção (-)	Diferença entre caudais, ξ (%)
0,15	Montante	35,1		1,040	3,87
	Centro	35,1	36,5	1,040	3,87
	Jusante	35,2		1,037	3,56
0,20	Montante	38,7		1,032	3,05
	Centro	38,8	39,9	1,029	2,85
	Jusante	38,8		1,029	2,79
0,30	Montante	49,0		1,041	3,96
	Centro	48,3	51,0	1,045	4,20
	Jusante	48,9		1,043	4,16

$$\text{Factor de correcção} - F_i = \frac{Q_i}{Q_c}$$

$$\text{Erro} - \xi_i = \frac{Q_i - Q_c}{Q_i} \times 100$$

Como se pode observar, os factores de correcção obtidos são próximos da unidade e os erros calculados entre o caudal total imposto e o que é obtido pela integração das medições de velocidade são sempre menores que 5%, pelo que as medições de velocidade apresentam resultados fiáveis.

4.5 Determinação dos valores médios em profundidade

Os valores da velocidade médios em profundidade, U_d , foram obtidos da seguinte forma,

$$U_d = \frac{\int u \, dz}{H} \quad (4.10)$$

em que: u é a velocidade média ao longo do tempo e H é a altura de água.

Esta média em profundidade foi efectuada para os dados do leito principal em fundo liso e fundo rugoso. Para os dados do leito de cheia, Duarte (2011) mostrou que a velocidade média em profundidade é coincidente com a velocidade a 40%, não sendo, portanto, necessário a integração para este caso.

Para a obtenção das tensões de Reynolds e componente de flutuação médias em profundidade recorreu-se à expressão 4.10, considerando, em vez da velocidade média no tempo, os respectivos valores de tensões e flutuação. Ao contrário da velocidade, para as tensões e flutuação os valores médios não são

coincidentes com os valores a 40%. Assim, para estes casos também se fez a integração das medições para o leito de cheia.

Ao contrário do verificado para fundo liso e rugoso, na configuração com elementos verticais a velocidade média em profundidade não é igual à velocidade a 40%. Deste modo, todos os dados de velocidade, respectiva flutuação e de tensões de Reynolds horizontais e verticais foram sujeitos a integração, em ambos os leitos.

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram, a título de exemplo, para cada altura relativa no ponto Y100, os perfis de velocidade sujeitos a integração. Apresenta-se também o perfil logarítmico que se ajusta ao perfil vertical de velocidades, obtido através da equação:

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{Z \times U_*}{\nu} \right) + A \quad (4.11)$$

em que: U é a velocidade longitudinal, U_* é a velocidade de atrito junto ao fundo, k é a constante de Von Kármán, Z a profundidade, ν é a viscosidade cinemática e A é a constante logarítmica.

A velocidade de atrito junto ao fundo é dada pela seguinte expressão:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (4.12)$$

em que: τ_0 é a tensão de arrastamento e ρ a massa volúmica da água.

Nezu e Nakagawa (1993) estabeleceram que k toma o valor de 0,412 e que A toma o valor de 5,29, no entanto estes valores são válidos para fundo liso. Para o caso das árvores admitiu-se $A = 5,1$, $A = 5,8$ e $A = 5,4$ para as alturas relativas 0,15, 0,20 e 0,30 respectivamente. Como não foi possível calcular as tensões de arrastamento para esta configuração, de modo simplificado admitem-se os valores de tensões para fundo rugoso calculados por Massa (2011).

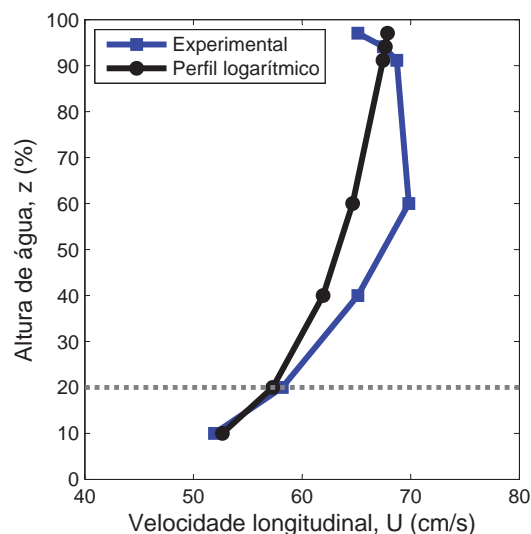


Figura 4.7: Perfil vertical da velocidade longitudinal em Y100 para $h_r = 0,15$ na configuração com árvores

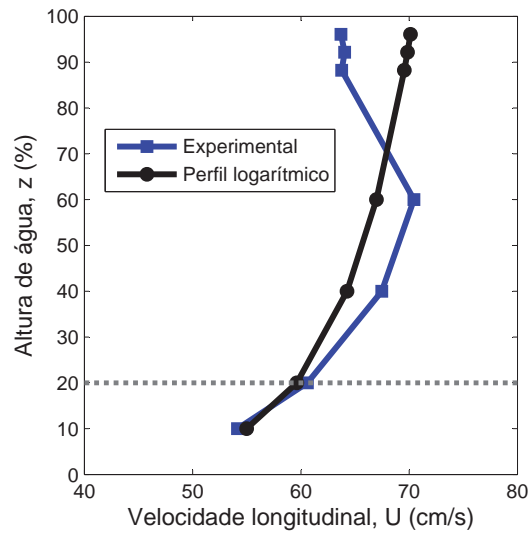


Figura 4.8: Perfil vertical da velocidade longitudinal em Y100 para $h_r = 0,20$ na configuração com árvores

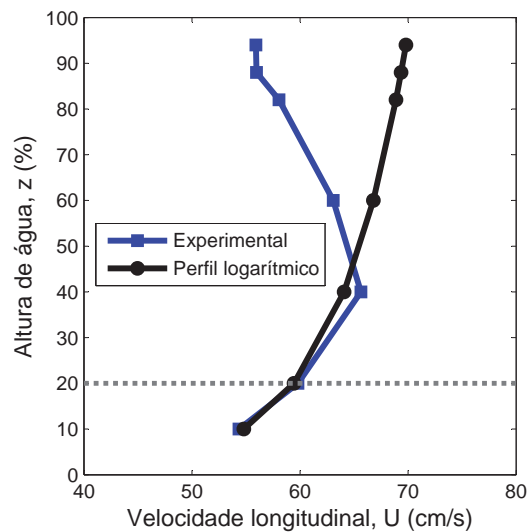


Figura 4.9: Perfil vertical da velocidade longitudinal em Y100 para $h_r = 0,30$ na configuração com árvores

Pode observar-se que os três perfis são praticamente coincidentes até 20% da altura de água apresentando, assim, um comportamento logarítmico. Deste modo, pode-se concluir que a meio do leito principal está-se na presença de um escoamento 2D.

Capítulo 5

Avaliação da influência da rugosidade nos leitos de cheia

5.1 Introdução

Neste capítulo, os resultados dos ensaios experimentais efectuados em fundo liso e fundo rugoso, na secção X7500, são apresentados e comparados com outros já medidos por Duarte (2011). Para cada uma destas configurações são estudadas duas alturas relativas - 0, 15 e 0, 20.

Na secção 5.2 apresenta-se as curvas de vazão total e em cada leito do canal experimental para ambas as configurações (fundo liso e fundo rugoso), com o objectivo de estudar a influência da rugosidade na capacidade de vazão do canal. São também apresentados os valores obtidos pelo *Single Channel Method*, SCM, e pelo *Divided Channel Method*, DCM.

Na secção 5.3 apresentam-se os resultados da distribuição da velocidade longitudinal para fundo liso e rugoso. Enquanto na secção 5.4 são apresentadas as distribuições das tensões de Reynolds, horizontais e verticais, e da componente de flutuação da velocidade longitudinal.

5.2 Capacidade de vazão

A representação da curva de vazão de um canal tem como objectivo estabelecer a razão entre o caudal escoado em regime uniforme e a altura de água, de modo a analisar a respectiva capacidade de vazão.

A capacidade de vazão de um canal também pode ser obtida através de métodos teóricos - *Single Channel Method*, SCM, ou *Divided Channel Method*, DCM, ambos tradicionais métodos 1D. Como o próprio nome indica o SCM considera a secção transversal como um elemento único. Por outro lado, o DCM decompõe a secção transversal através de verticais, permitindo a consideração em separado de elementos com diferentes rugosidades.

Para calcular o caudal, Q_{SCM} , pelo *Single Channel Method*, utiliza-se a fórmula de *Manning-Strickler*, dada por:

$$Q_{SCM} = K_{eq} \times S \times R^{2/3} \times i^{1/2} \quad (5.1)$$

em que: Q_{SCM} é o caudal total obtido pelo SCM (m^3/s), K_{eq} é o coeficiente de rugosidade equivalente ($m^{1/3}/s$), S é a área da secção (m^2), R é o raio hidráulico (m) e i é a inclinação média do canal (m/m).

Para o caso em estudo, a secção transversal do escoamento possui vários tipos de rugosidade, razão pela qual é necessário a utilização de um K_{eq} , dado por:

$$K_{eq} = \left(\frac{P}{\sum P_i / K_i^{3/2}} \right)^{2/3} \quad (5.2)$$

em que: K_{eq} é o coeficiente de rugosidade equivalente ($m^{1/3}/s$), P é o perímetro molhado total (m) e P_i é o comprimento de perímetro molhado a que corresponde um coeficiente K_i (Lencastre, 1996).

Massa (2011) estabeleceu um valor do coeficiente de rugosidade para o cimento alisado e para a relva sintética de $108 m^{1/3}/s$ e $58 m^{1/3}/s$, respectivamente, sendo estes os valores utilizados nesta dissertação. É de notar que o K é tanto maior quanto mais lisa for a superfície.

Para obter o caudal, Q_{DCM} , pelo *Divided Channel Method*, também se utiliza a fórmula de *Manning-Strickler*, calculando separadamente o caudal do leito principal (cimento alisado) e dos leitos de cheia (panos de relva sintética), dada por:

$$Q_{DCM} = \sum K_j \times S_j \times R_j^{2/3} \times i^{1/2} \quad (5.3)$$

em que: Q_{DCM} é o caudal total obtido pelo DCM (m^3/s), S_j e R_j é a área da secção (m^2) e o perímetro molhado (m) a que corresponde um coeficiente de rugosidade K_j ($m^{1/3}/s$) e i é a inclinação média do canal (m/m).

A capacidade de vazão do canal experimental, em fundo liso e fundo rugoso, e os valores correspondentes obtidos pelo SCM e DCM, para as alturas relativas 0, 15 e 0, 20, é apresentada na Figura 5.1. Os símbolos sem preenchimento representam os ensaios efectuados por Duarte (2011).

Verifica-se que a capacidade de vazão total diminui com o aumento da rugosidade nos leitos de cheia. Como se pode observar, o SCM subestimou a capacidade de vazão do canal. Este método demonstra ser pouco representativo da realidade, principalmente quando aplicado em fundo rugoso, e demasiado simplificado. Em comparação, o DCM apresentou resultados mais satisfatórios, ainda que sobrestimados em relação à realidade.

A capacidade de vazão do leito principal, dos leitos de cheia e dos valores correspondentes obtidos pelo DCM é apresentada na Figura 5.2. Verifica-se que a capacidade de vazão em cada leito diminuiu com a introdução da rugosidade. O DCM apresenta resultados muito satisfatórios quando efectuado para o leito de cheia, tanto em fundo liso como em fundo rugoso. Para o leito principal, sobrestimou a capacidade de vazão.

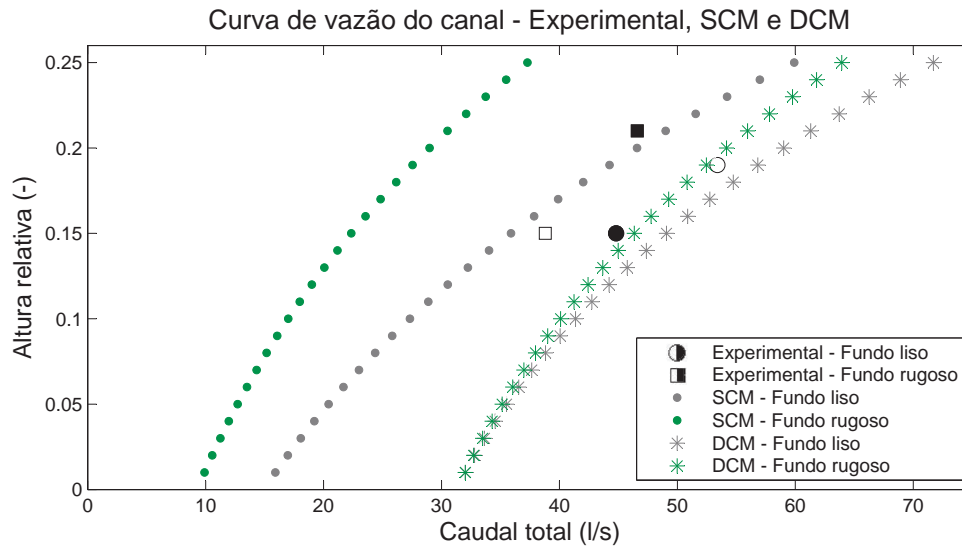


Figura 5.1: Capacidade de vazão do canal

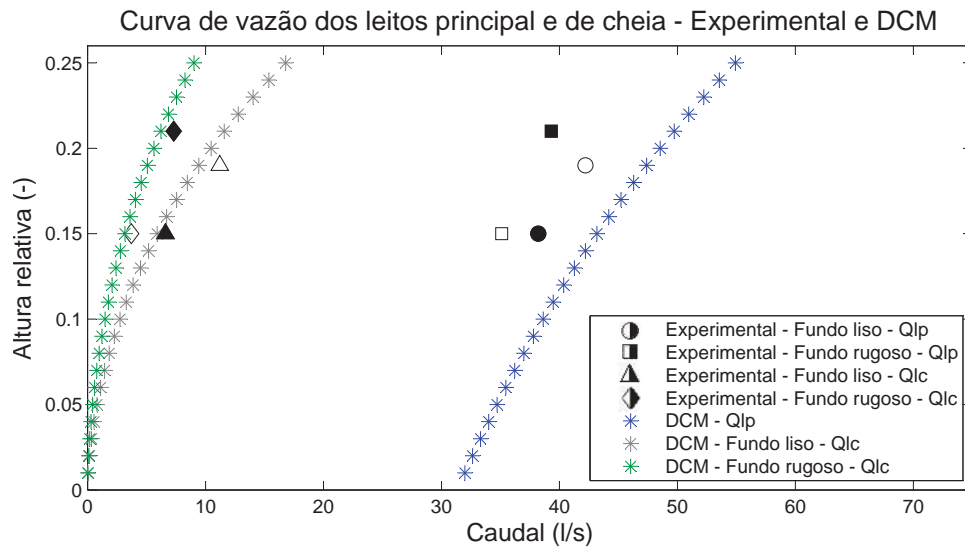


Figura 5.2: Capacidade de vazão do leito principal e dos leitos de cheia

5.3 Distribuição de velocidades

Neste subcapítulo, apresenta-se a distribuição da velocidade longitudinal, medida na secção X7500, para as alturas relativas de 0, 15 e 0, 20 em fundo liso e fundo rugoso. Os dados de $h_r = 0, 15$ em fundo rugoso e de $h_r = 0, 20$ em fundo liso foram recolhidos por Duarte (2011). Estes resultados são representados por símbolos sem preenchimento.

Os resultados da distribuição da velocidade longitudinal média no tempo são apresentados sob a forma de isolinhas e foram normalizados pela velocidade média na secção, U_s . As cores quentes representam

os valores mais elevados e as cores frias, os valores mais baixos. Todos os valores de velocidade estão corrigidos pelos respectivos factores, conforme referido na Secção 4.4.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam a distribuição transversal da velocidade média em profundidade para $h_r = 0,15$ e $h_r = 0,20$, em ambas as configurações. Independentemente da altura relativa, a ordem de grandeza dos valores da velocidade diminui com a passagem de fundo liso para fundo rugoso, nomeadamente no leito de cheia, concluindo-se que com o aumento da rugosidade, a capacidade de vazão do canal diminui. O gradiente lateral de velocidades aumenta para fundo rugoso, originando uma camada de mistura mais intensa.

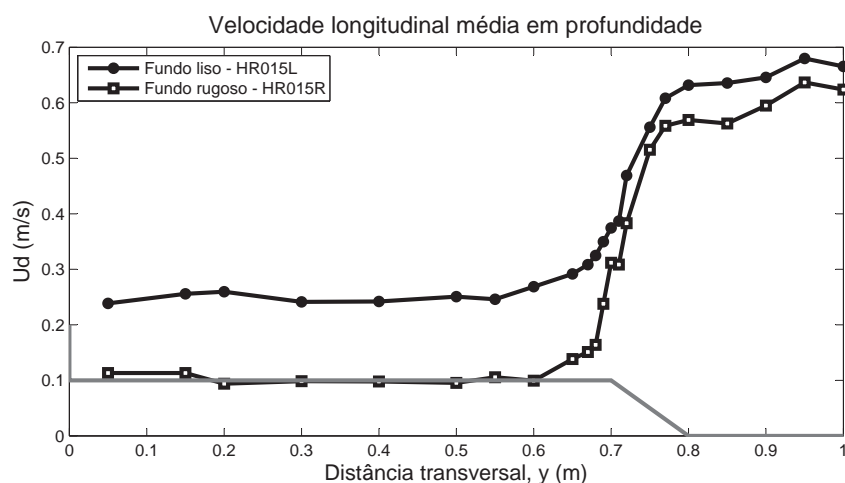


Figura 5.3: Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0,15$ em fundo liso e rugoso

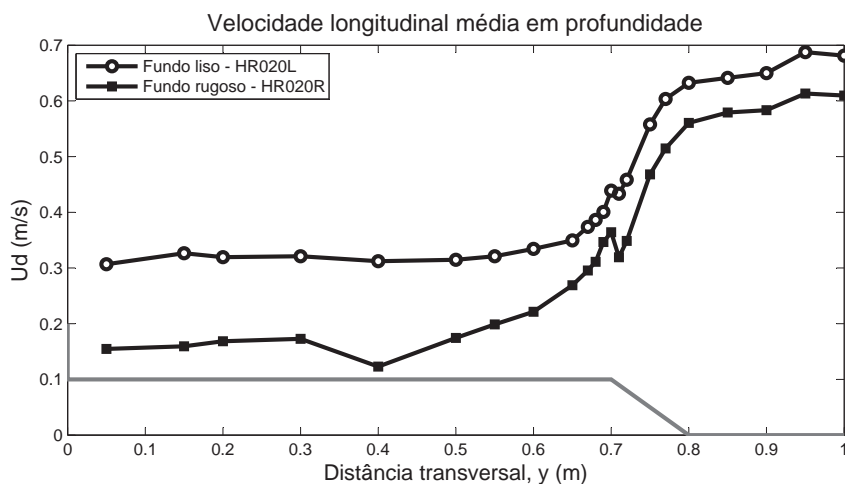
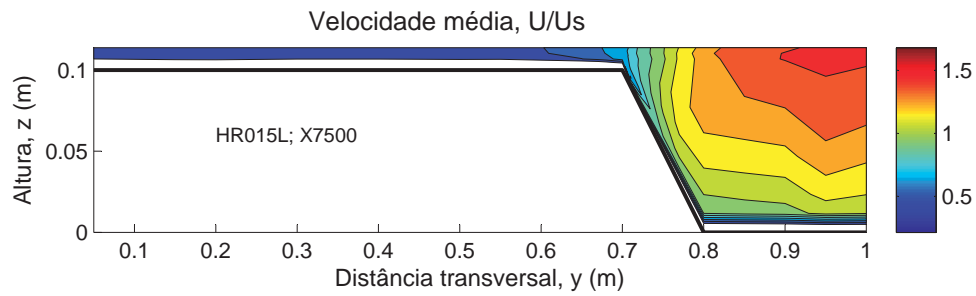
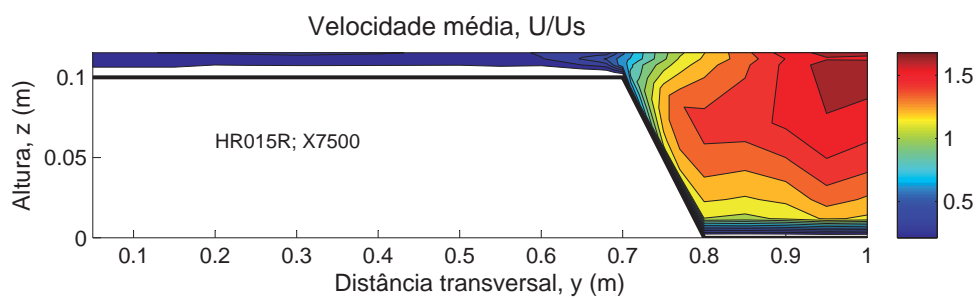
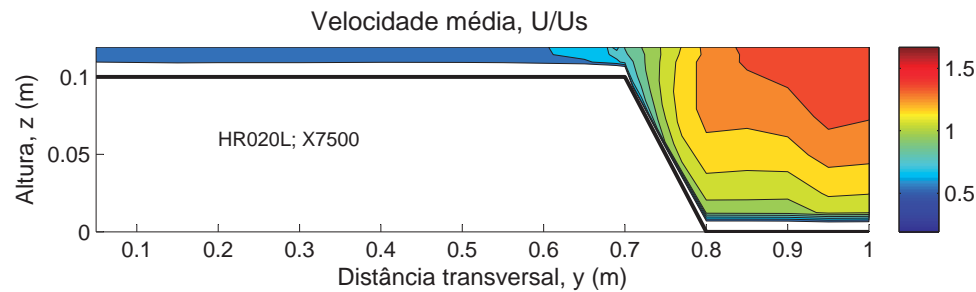
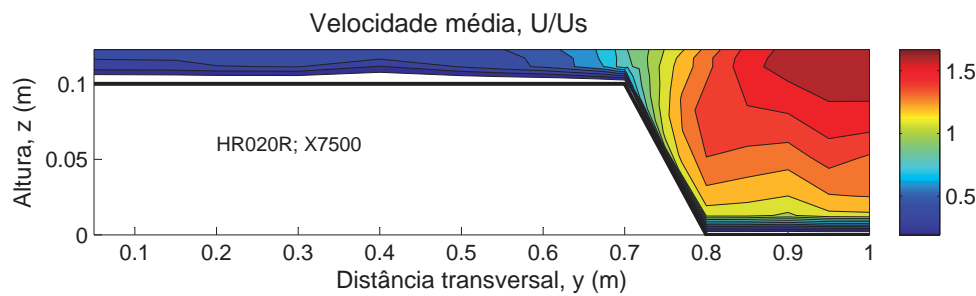


Figura 5.4: Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0,20$ em fundo liso e rugoso

Nas Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 estão apresentadas a distribuição da velocidade longitudinal para as duas alturas relativas em fundo liso (HR015L e HR020L) e em fundo rugoso (HR015R e HR020R).

Figura 5.5: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,15$ em fundo lisoFigura 5.6: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,15$ em fundo rugosoFigura 5.7: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,20$ em fundo lisoFigura 5.8: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,20$ em fundo rugoso

Com a introdução da rugosidade, a velocidade no leito de cheia diminuiu, evidenciando um aumento da transferência de quantidade de movimento originada pelo gradiente lateral da velocidade. Comparando HR015R com HR015L, o escoamento mais lento no leito de cheia tem um efeito retardador no escoamento do leito principal, fazendo com que as isolinhas recuem no sentido do leito principal junto à superfície. A curvatura das isolinhas na zona da interface indica a presença de estrutura turbulenta com intensidade significativa. Para a maior altura relativa, observa-se uma diminuição da curvatura das isolinhas na zona da interface o que vai de encontro ao esperado, isto é, com o aumento da altura de água a intensidade da camada de mistura diminui.

5.4 Distribuição das tensões de Reynolds

Nesta secção apresenta-se a distribuição das tensões de Reynolds horizontais e verticais, τ_{xy} e τ_{xz} respectivamente, e da componente de flutuação da velocidade longitudinal, RMS_U , para as alturas relativas de 0, 15 e 0, 20 em fundo liso e fundo rugoso.

Do mesmo modo da velocidade, os resultados da distribuição das tensões são apresentados sob a forma de isolinhas, onde as cores quentes representam os valores mais elevados e as cores frias, os valores mais baixos.

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam a distribuição transversal das tensões de Reynolds horizontais médias em profundidade, τ_{xy} , para as alturas 0, 15 e 0, 20 em fundo liso e fundo rugoso.

Tensões de Reynolds no plano (x,y) aferem a transferência de quantidade de movimento no plano horizontal. Estas transferências desenvolvem-se principalmente na interface entre os leitos, onde as tensões crescem abruptamente em valor absoluto (cf. Figuras 5.9 e 5.10), devido ao diferencial de velocidades. A introdução da rugosidade nos leitos de cheia gera um maior gradiente lateral de velocidades, levando ao aumento dos valores das tensões, principalmente em $h_r = 0,20$, face ao verificado para fundo liso.

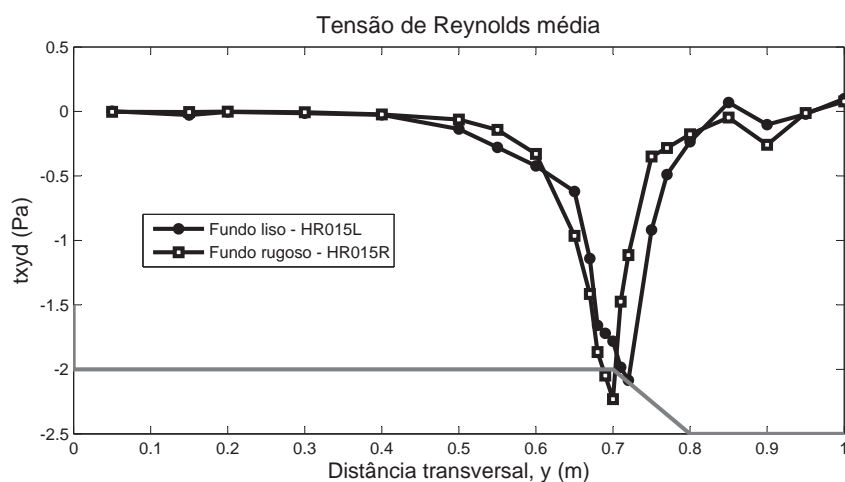


Figura 5.9: Distribuição transversal das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0,15$ em fundo liso e rugoso

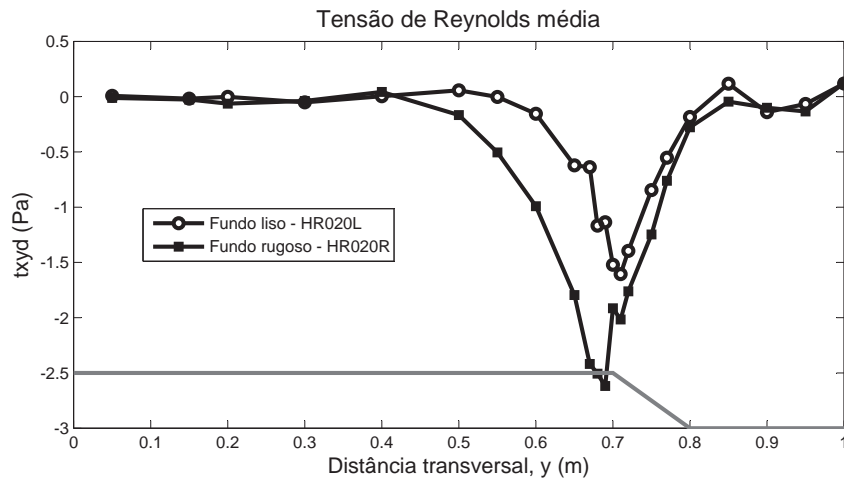


Figura 5.10: Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,20$ em fundo liso e rugoso

As Figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam a distribuição das tensões de Reynolds horizontais, τ_{xy} , para $h_r = 0,15$ e $h_r = 0,20$ em fundo liso (HR015L e HR020L) e em fundo rugoso (HR015R e HR020R).

A maior parte da secção apresenta valores de tensões praticamente nulos, independentemente da configuração adoptada e da altura relativa. É de particular relevância, a zona de tensões negativas acentuadas na interface entre os leitos. Deste resultado conclui-se que vórtices de eixo vertical, quando acompanhados de elevadas tensões de Reynolds, provocam significativas transferências de quantidade de movimento entre a elevada velocidade no leito principal e a baixa velocidade no leito de cheia. Verifica-se, ainda, que a região de maiores tensões se estende na diagonal na direcção do leito principal, o que significa que na interface a zona de maior interacção vai-se afastando progressivamente da superfície livre.

Comparando HR020L com HR015L, os valores das tensões τ_{xy} diminuíram, apontando para uma interacção turbulenta menor, à medida que a altura de água aumenta. O mesmo já não se verifica para o fundo rugoso, já que as tensões de Reynolds aumentaram de HR015R para HR020R, evidenciando o facto de que a turbulência adicional gerada pela relva ser mais preponderante do que o aumento da altura de água.

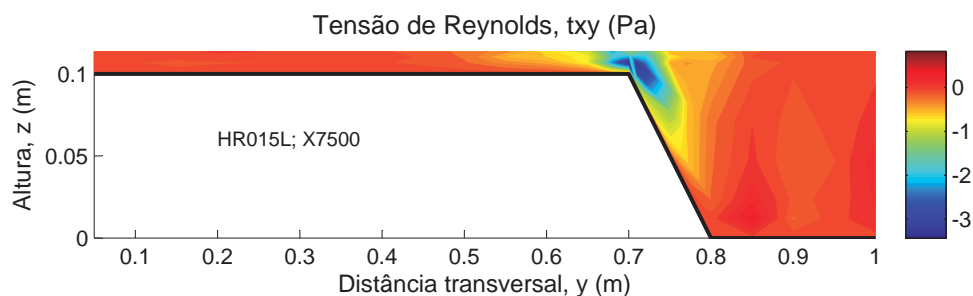


Figura 5.11: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,15$ em fundo liso

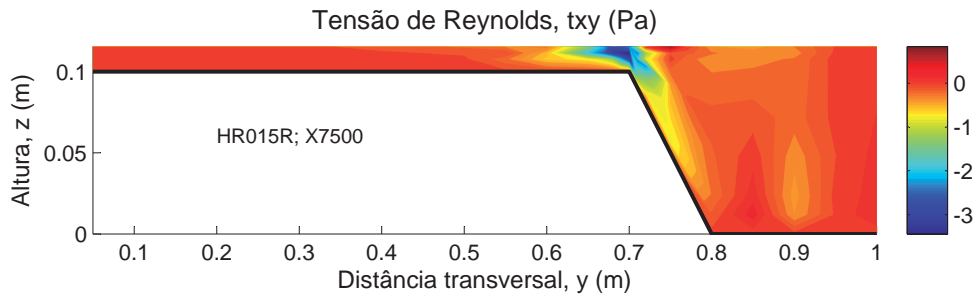


Figura 5.12: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso

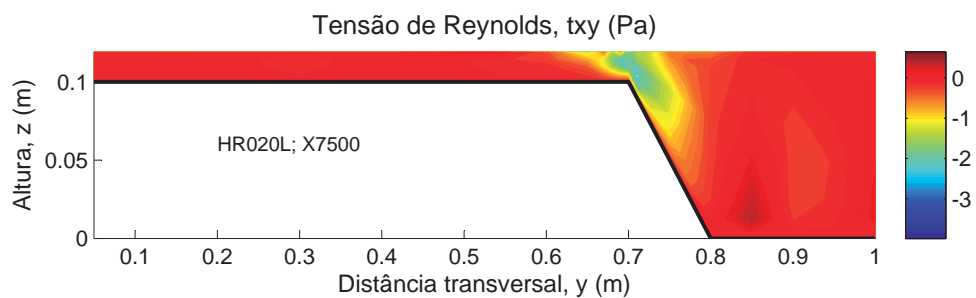


Figura 5.13: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 20$ em fundo liso

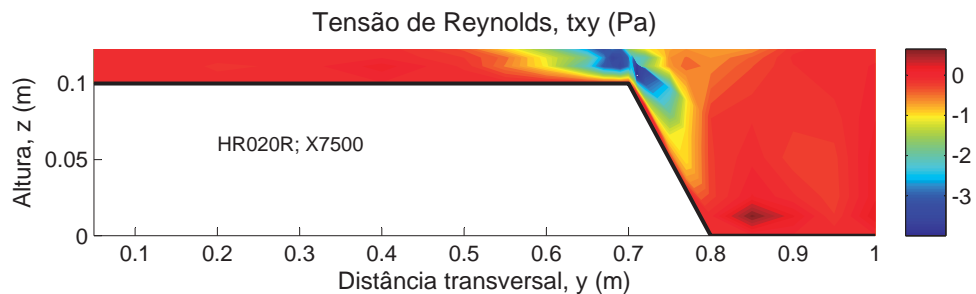


Figura 5.14: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso

Como referido anteriormente, só são apresentados os valores das tensões de Reynolds verticais para o leito principal, já que não é possível medir correctamente na restante parte do canal, por as hastes do *Vectrino* estarem fora de água. Deste modo, não faz sentido apresentar a distribuição transversal das tensões e, portanto, só se apresentam as isolinhas (*cf.* Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18).

Em ambas as configurações e alturas de água, as tensões negativas estão significativamente localizadas na interface entre os leitos. Este aspecto é relevante, pois significa que existem correntes ascendentes que estão a transmitir as velocidades mais baixas junto ao fundo, criando, conseqüentemente, tensões tangenciais. As tensões positivas máximas junto ao fundo do leito principal correspondem a uma típica camada limite 2D. Estes resultados são idênticos aos obtidos por Sanjou *et al.* (2011). Comparando as duas alturas relativas, para $h_r = 0, 20$ as tensões tomam valores mais baixos.

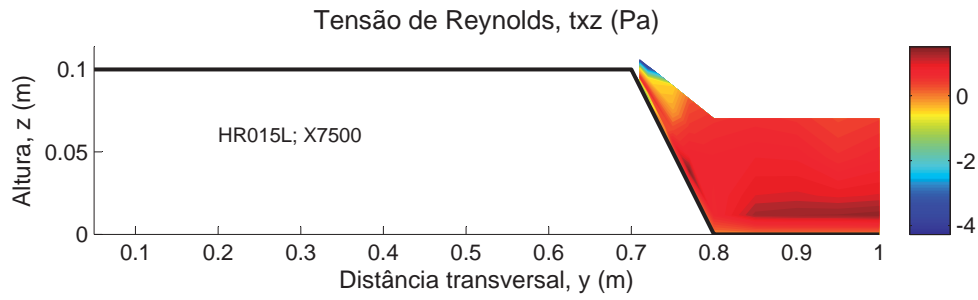


Figura 5.15: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,15$ em fundo liso

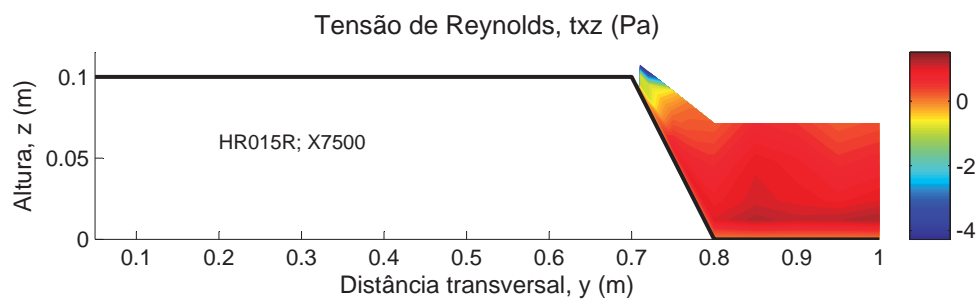


Figura 5.16: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso

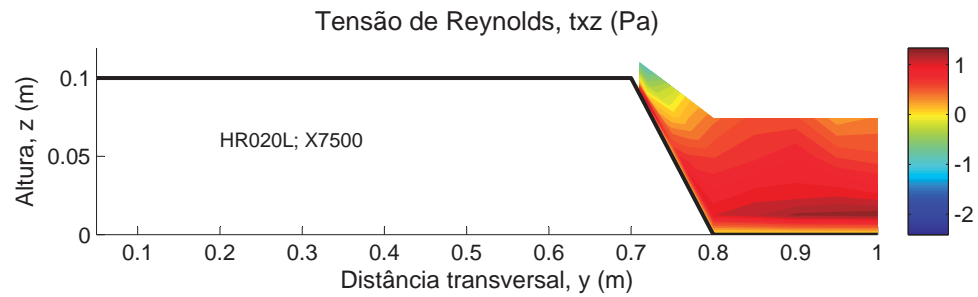


Figura 5.17: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,20$ em fundo liso

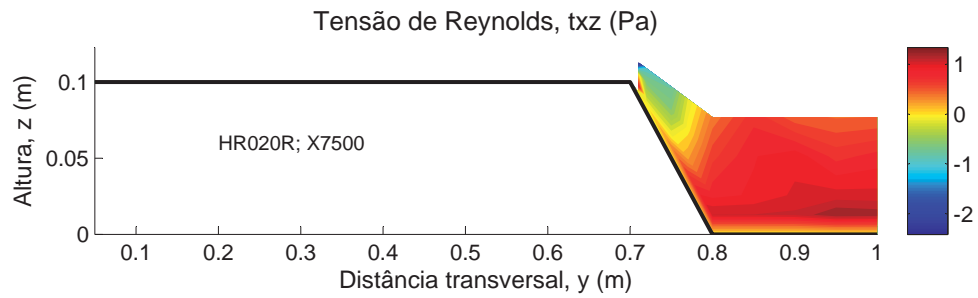


Figura 5.18: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso

Por último, apresentam-se os resultados da flutuação da velocidade longitudinal, RMS_U , cuja distribuição transversal é mostrada nas Figuras 5.19 e 5.20, respectivamente. Por outro lado, as Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 apresentam a distribuição da flutuação na secção transversal do canal, para as duas alturas relativas em fundo liso (HR015L e HR020L) e em fundo rugoso (HR015R e HR020R).

A flutuação da velocidade diz respeito à intensidade turbulenta, sendo, portanto, expectável que o seu máximo ocorra na interface entre o leito principal e o leito de cheia, tal como se pode observar (cf. Figuras 5.19 e 5.20).

Pelos resultados obtidos por Yang *et al.* (2007), apresentados no Capítulo 2, seria de esperar que a intensidade turbulenta aumentasse com a introdução da vegetação, mas neste caso tal não se verifica para $h_r = 0,15$. Para a altura relativa de 0,20 a turbulência aumenta de fundo liso para fundo rugoso.

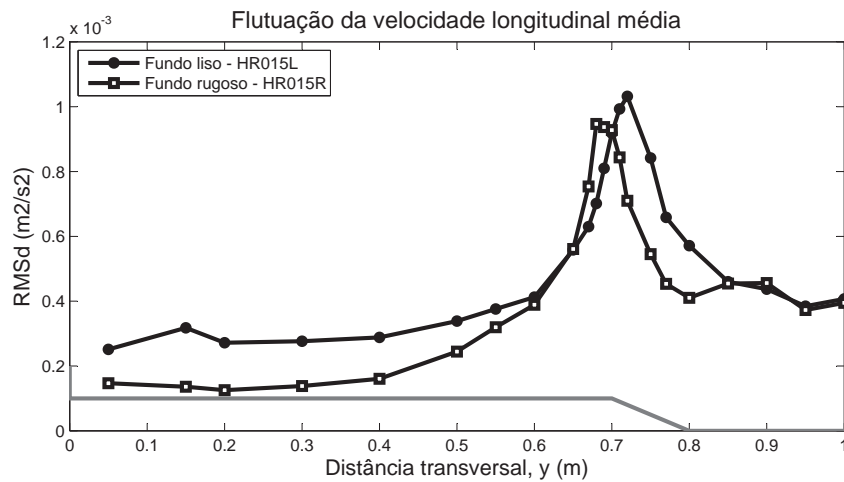


Figura 5.19: Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo liso e rugoso

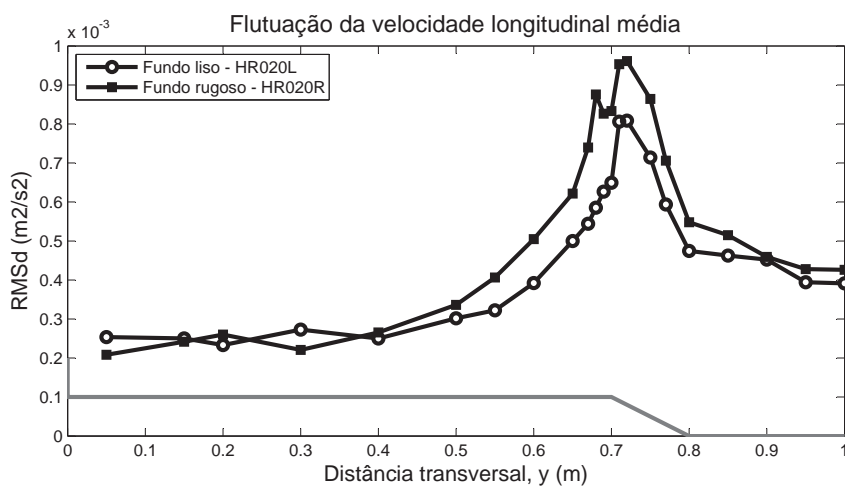


Figura 5.20: Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,20$ em fundo liso e rugoso

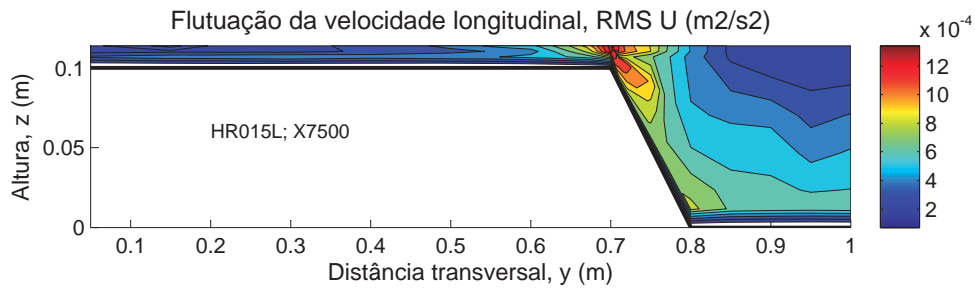


Figura 5.21: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS U - h_r = 0,15$ em fundo liso

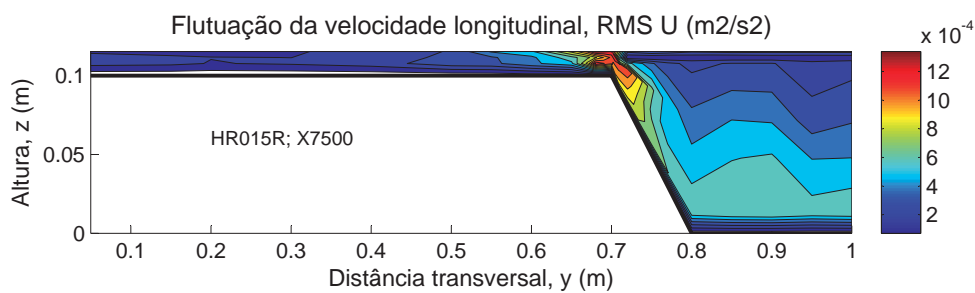


Figura 5.22: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso

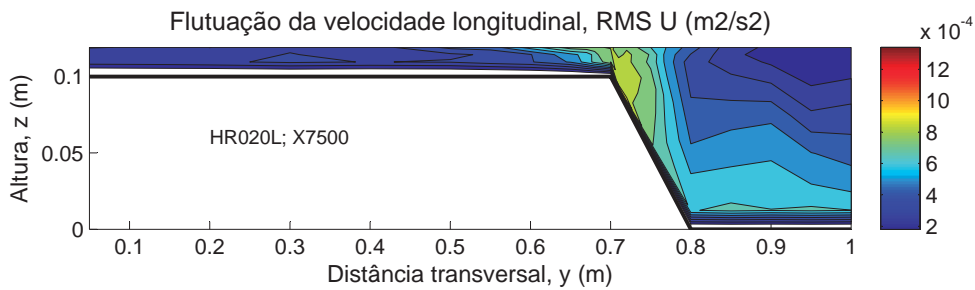


Figura 5.23: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS U - h_r = 0,20$ em fundo liso

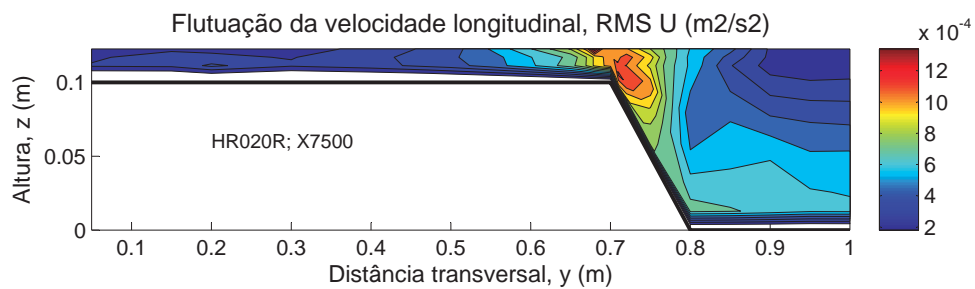


Figura 5.24: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS U - h_r = 0,20$ em fundo rugoso

Capítulo 6

Avaliação da influência dos elementos verticais na interface dos leitos

6.1 Introdução

Neste capítulo, os resultados dos ensaios experimentais efectuados em fundo rugoso, na secção X7500, e em fundo rugoso com elementos verticais na interface entre o leito principal e o leito de cheia, aproximadamente na secção X7700, são apresentados e comparados com outros já medidos por Duarte (2011). Para cada uma destas configurações são estudadas três alturas relativas - 0, 15, 0, 20 e 0, 30.

Na secção 6.2 apresentam-se as curvas de vazão total e em cada leito do canal experimental para ambas as configurações (fundo rugoso e fundo rugoso com árvores), com o objectivo de estudar a influência dos elementos verticais na capacidade de vazão do canal.

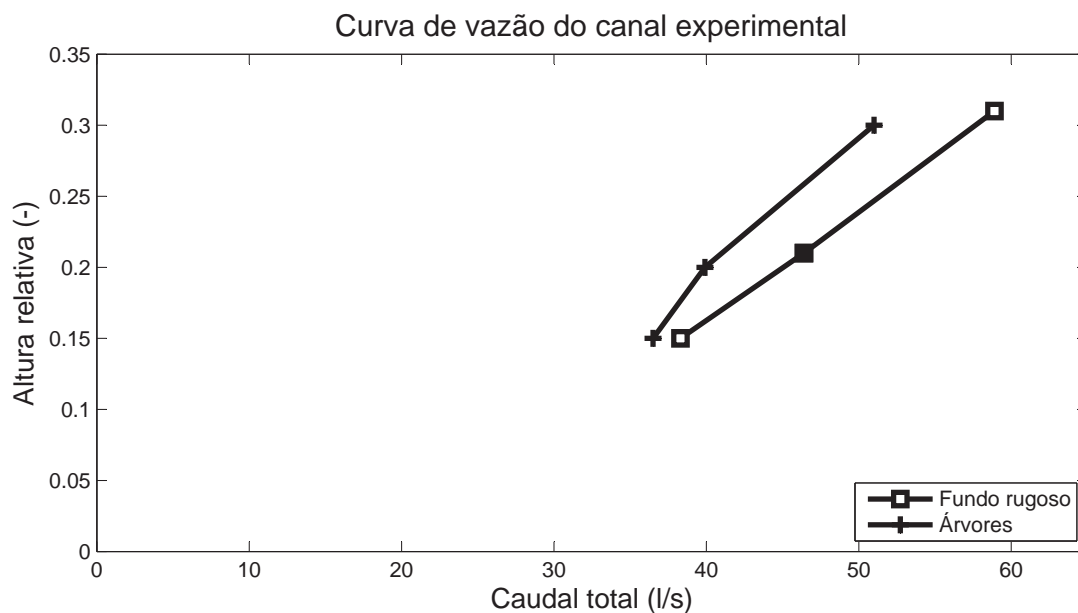
A secção 6.3 tem como objectivo estudar a influência das árvores no escoamento. Para tal, faz-se a comparação entre fundo rugoso e fundo rugoso com elementos verticais na medição ao centro X7737. Na subsecção 6.3.1 apresentam-se os resultados da distribuição da velocidade longitudinal e na subsecção 6.3.2 são apresentadas as distribuições das tensões de Reynolds, horizontais e verticais, e da componente de flutuação da velocidade longitudinal.

A secção 6.4 tem como objectivo estudar a influência da posição de medição entre dois elementos verticais consecutivos. Assim, faz-se a comparação entre três posições de medição distintas - X7705, X7737 e X7769 - que tomam o nome de Montante, Centro e Jusante, respectivamente. Na subsecção 6.3.1 apresentam-se os resultados da distribuição da velocidade longitudinal e na subsecção 6.3.2 são apresentadas as distribuições das tensões de Reynolds, horizontais e verticais, e da componente de flutuação da velocidade longitudinal.

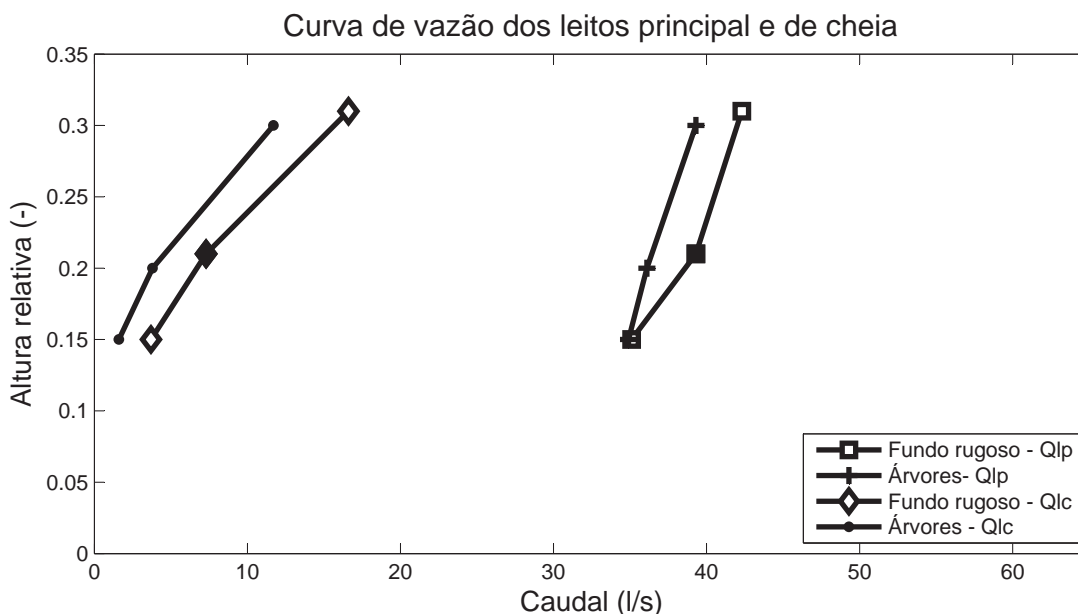
6.2 Capacidade de vazão

A capacidade de vazão do canal experimental para fundo rugoso (pano de relva sintética) e para fundo rugoso com elementos verticais na interface (pano de relva sintética com árvores artificiais) é apresentada na Figura 6.1. A Figura 6.1(a) tem em conta o caudal total e a Figura 6.1(b) os caudais do leito principal e do leito de cheia. Os marcadores não preenchidos representam os ensaios efectuados por Duarte (2011).

Verifica-se que a capacidade de vazão total e em cada leito do canal diminui com a introdução dos elementos verticais na interface. Pode, também, observar-se que com o aumento da altura relativa, a capacidade de vazão em termos relativos diminui, ou seja, a distância horizontal entre cada dois pontos aumenta com o aumento da altura relativa. Este facto deve-se à influência que as árvores têm em cada altura relativa, pois, devido à sua copa esférica, quanto maior for a altura de água, mais área de árvore está em contacto com o escoamento.



(a) Caudal total



(b) Caudais em cada leito

Figura 6.1: Relação entre a capacidade de vazão de cada caso

A Figura 6.2 mostra uma esquematização de meia secção do canal onde estão representadas as três alturas de água e pode-se constatar que a superfície das árvores em contacto com o escoamento é progressivamente crescente com as alturas relativas estudadas.

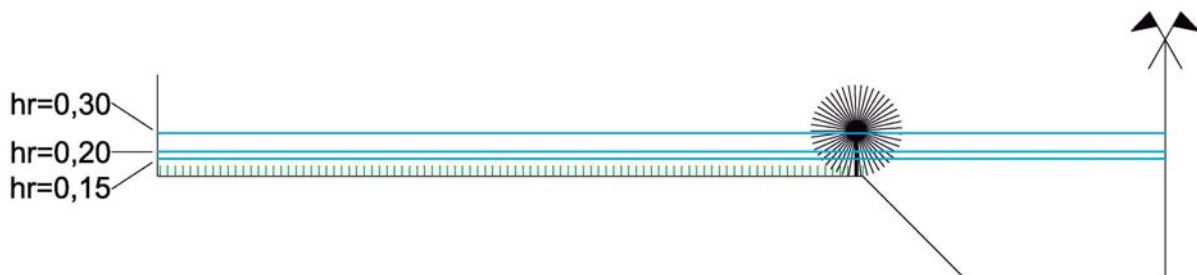


Figura 6.2: Influência da árvore para cada altura relativa

6.3 Influência dos elementos verticais - fundo rugoso e árvores

6.3.1 Distribuição de velocidades

Nesta subsecção, apresenta-se a distribuição da velocidade longitudinal para as alturas relativas de 0, 15, 0, 20 e 0, 30, em fundo rugoso (X7500) e fundo rugoso com árvores (X7737). Os dados de $h_r = 0, 15$ e $h_r = 0, 30$ em fundo rugoso foram recolhidos por Duarte (2011). Estes resultados são representados por símbolos sem preenchimento.

Os resultados da distribuição da velocidade longitudinal média no tempo são apresentados sob a forma de isolinhas e foram normalizados pela velocidade média na secção, U_s . As cores quentes representam os valores mais elevados e as cores frias, os valores mais baixos. Todos os valores de velocidade estão corrigidos pelos respectivos factores, conforme referido na Secção 4.4.

Os testes realizados para a altura relativa de 0, 15 na configuração com elementos verticais, foram os que levantaram mais problemas, não só no estabelecimento de regime uniforme, como também no decorrer das medições. Após o processamento e análise dos dados, relativos a esta altura, constatou-se que as medições a 80% do leito de cheia, nos pontos Y72, Y75, Y77 e Y80 estavam erradas. Os elementos verticais foram colocados aproximadamente na posição Y70 e, portanto, o erro nestas medições verifica-se nos pontos imediatamente após as árvores. Este erro foi atribuído a um conjunto de factores: medições junto às árvores; menor altura relativa e, como tal, menor altura de água; nas medições a 80% do leito de cheia, para esta altura relativa, as hastes do *Vectrino* ficam fora de água. Como todas estas causas são limitações inerentes às condições experimentais e ao próprio equipamento de medição, os pontos Y72, Y75, Y77 e Y80 não foram considerados, aparecendo assim uma porção branca nos gráficos das isolinhas para $h_r = 0, 15$, correspondentes à eliminação destes pontos.

As Figuras 6.3, 6.4 e 6.5 apresentam a distribuição transversal da velocidade média em profundidade para $h_r = 0, 15$, $h_r = 0, 20$ e $h_r = 0, 30$, para fundo rugoso com e sem árvores.

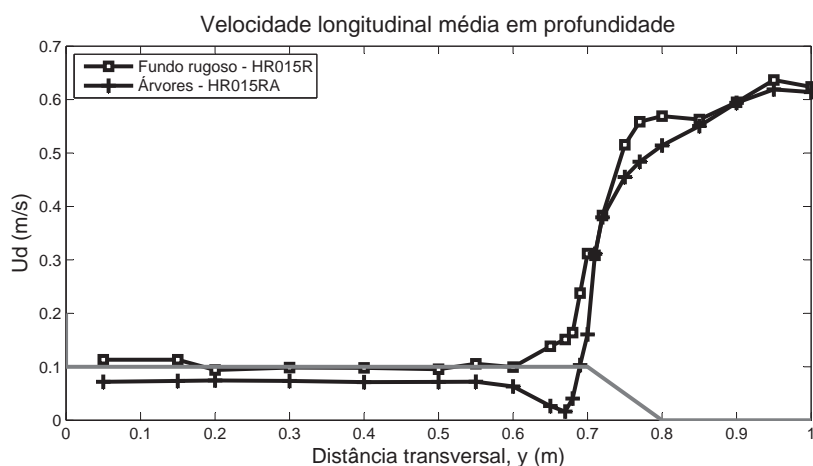


Figura 6.3: Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso com e sem árvores

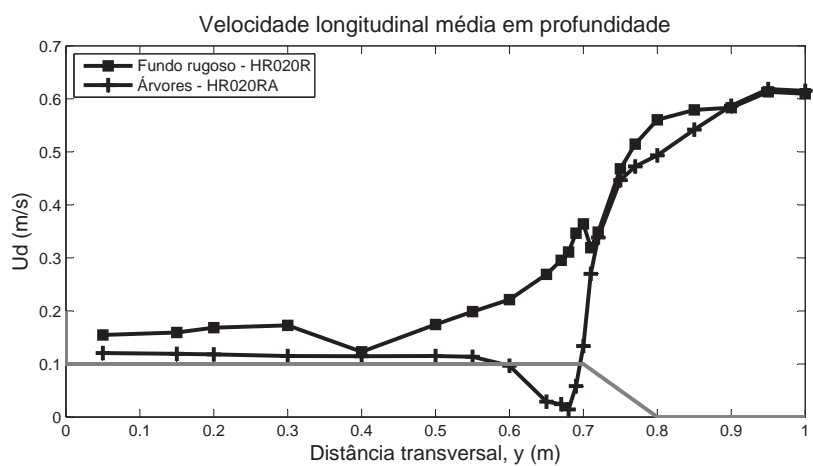


Figura 6.4: Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0,20$ em fundo rugoso com e sem árvores

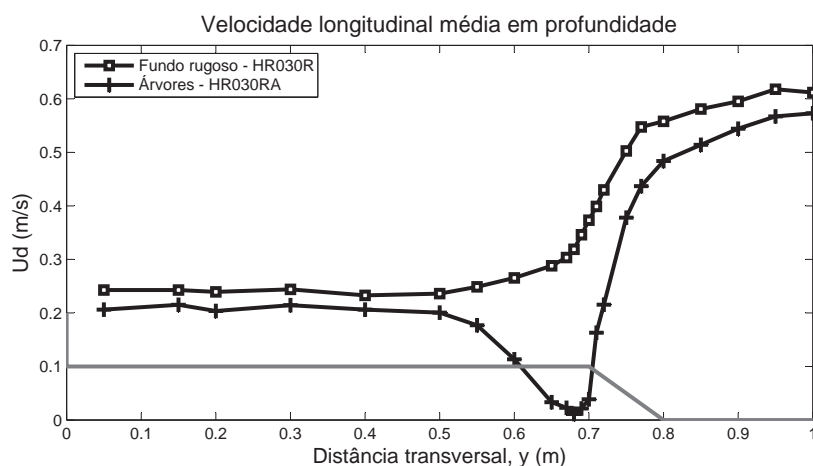


Figura 6.5: Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0,30$ em fundo rugoso com e sem árvores

A ordem de grandeza dos valores da velocidade aumenta com o aumento da altura relativa e diminui com a passagem de fundo rugoso para fundo rugoso com árvores, aferindo que com a introdução dos elementos verticais, a capacidade de vazão do canal diminui. Tanto em fundo liso como em fundo rugoso, a distribuição transversal da velocidade longitudinal tem sensivelmente uma forma em "S", no entanto, para a configuração com árvores, a distribuição da velocidade tem uma forma aproximadamente em "V", evidenciando o facto de que a velocidade do escoamento diminui localmente na zona da árvore.

Nas Figuras 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 estão apresentadas a distribuição da velocidade longitudinal para as três alturas relativas em fundo rugoso (HR015R, HR020R e HR030R) e em fundo rugoso com árvores, medida na secção X7737 (HR015RA, HR020RA e HR030RA).

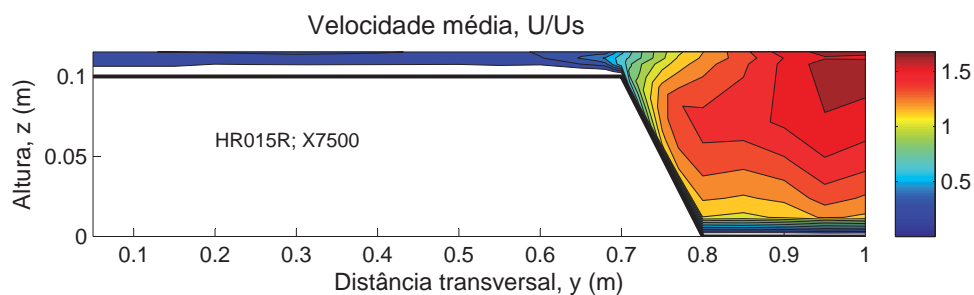


Figura 6.6: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso

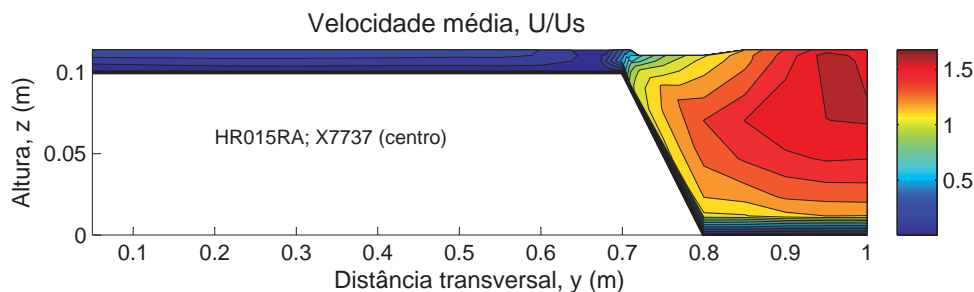


Figura 6.7: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

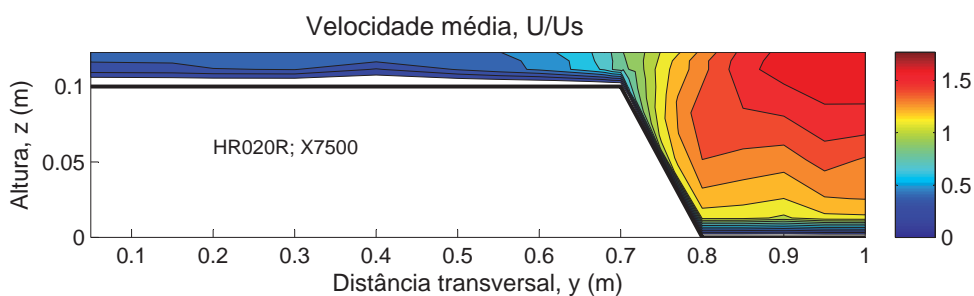


Figura 6.8: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,20$ em fundo rugoso

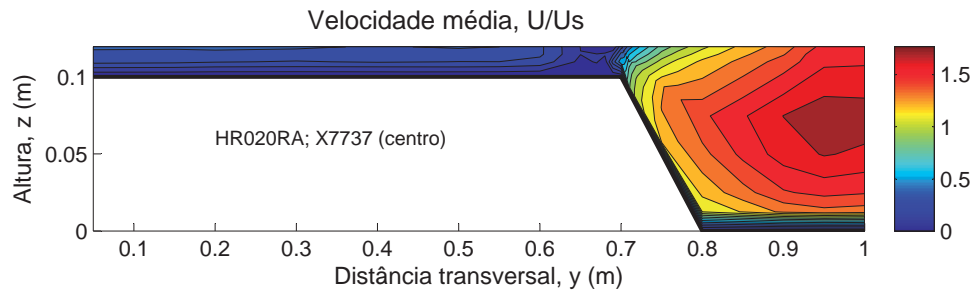


Figura 6.9: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

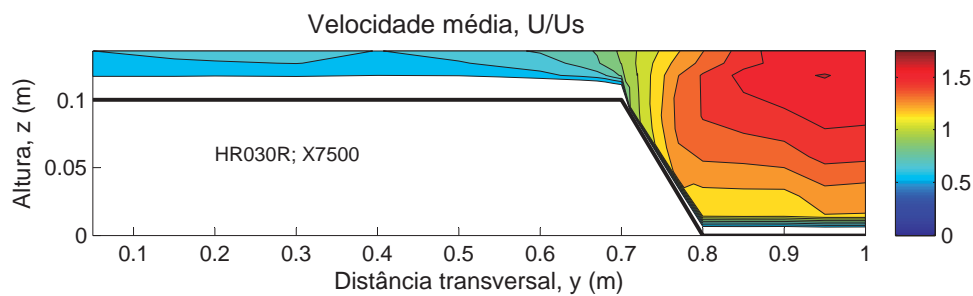


Figura 6.10: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,30$ em fundo rugoso

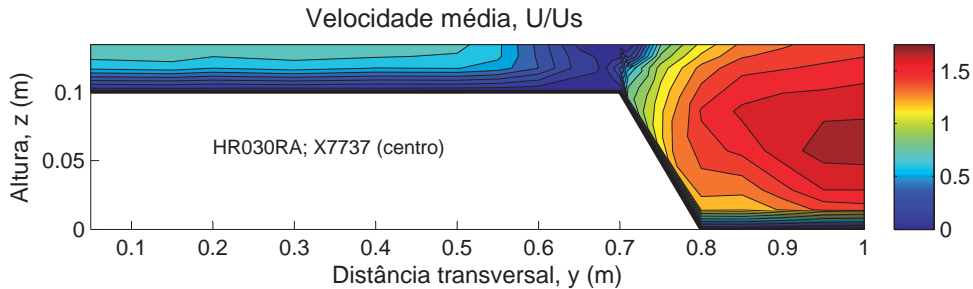


Figura 6.11: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

Para todas as alturas, com a introdução das árvores na interface a velocidade diminuiu em ambos os leitos. Para a configuração com elementos, a presença da árvore emergente tem um efeito retardador no escoamento do leito principal, fazendo com que as isolinhas recuem no sentido do leito principal, característica tão mais visível quanto maior a altura relativa. Em consequência, com o aumento da altura de água, a velocidade máxima vai-se deslocando progressivamente para o centro do leito principal, ao contrário do que acontece para fundo rugoso, onde a velocidade máxima ocorre à superfície.

6.3.2 Distribuição das tensões de Reynolds

A distribuição das tensões de Reynolds horizontais e verticais, τ_{xy} e τ_{xz} , e da componente de flutuação da velocidade longitudinal, RMS_U , para as alturas relativas de 0,15, 0,20 e 0,30 em fundo rugoso com e sem elementos verticais na interface entre leitos, é apresentada neste subcapítulo.

Tal como os resultados anteriores, a distribuição das tensões é apresentada sob a forma de isolinhas, onde as cores quentes representam os valores mais elevados e as cores frias, os valores mais baixos.

A distribuição transversal das tensões τ_{xy} médias em profundidade, para as três alturas relativas, é apresentada nas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14. Tensões de Reynolds no plano (x,y) aferem a transferência de quantidade de movimento no plano horizontal. Estas transferências desenvolvem-se principalmente na interface entre os leitos, onde as tensões crescem abruptamente em valor absoluto, devido à diferença de velocidade entre os leitos.

Verifica-se que para $h_r = 0,15$ (cf. Figura 6.12) a tensão máxima negativa na interface ocorre para fundo rugoso, para $h_r = 0,20$ (cf. Figura 6.13) são aproximadamente iguais, mas para $h_r = 0,30$ (cf. Figura 6.14) a tensão máxima ocorre para a configuração com elementos, pondo em evidência o facto de que é nesta altura relativa que as árvores exercem mais influência sobre o escoamento.

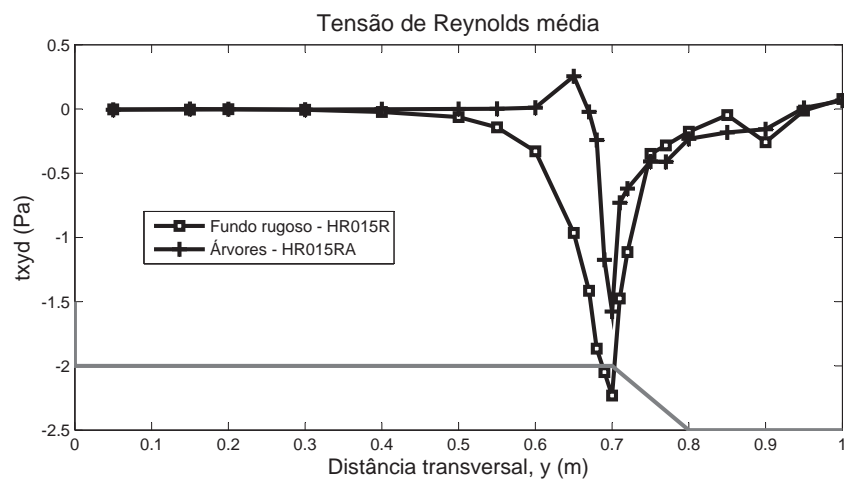


Figura 6.12: Distribuição transversal das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso com e sem árvores

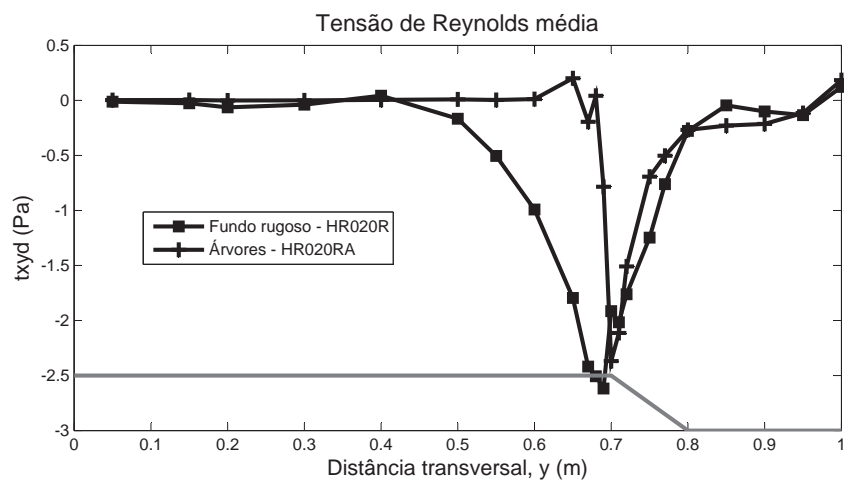


Figura 6.13: Distribuição transversal das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0,20$ em fundo rugoso com e sem árvores

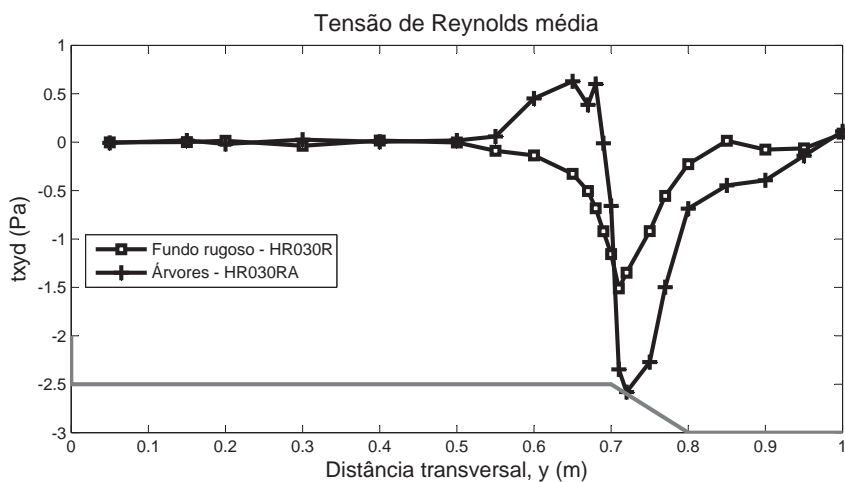


Figura 6.14: Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com e sem árvores

A distribuição das tensões na secção transversal do canal para as três alturas de água em fundo rugoso sem e com árvores é apresentada nas Figuras 6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20.

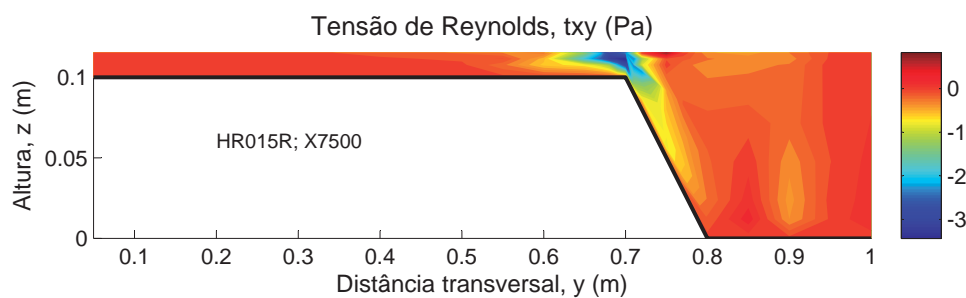


Figura 6.15: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso

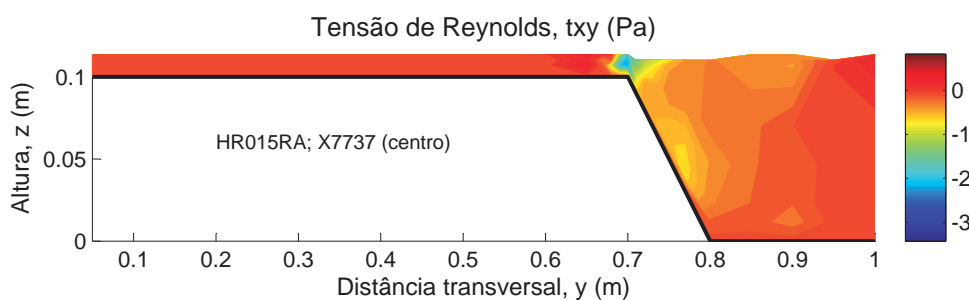


Figura 6.16: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

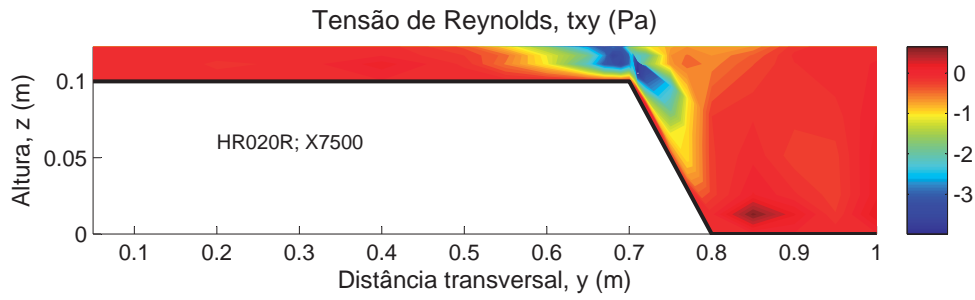


Figura 6.17: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso

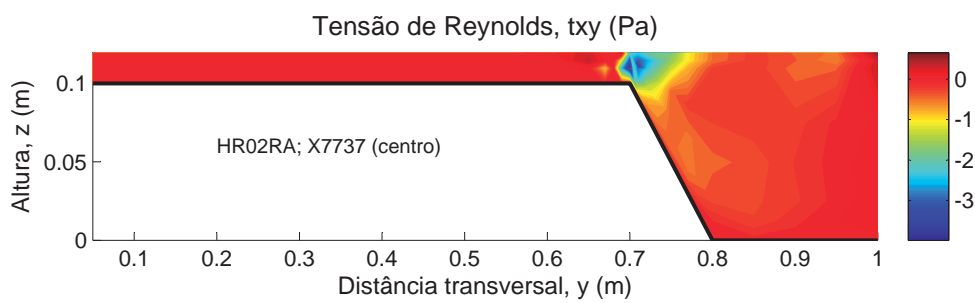


Figura 6.18: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

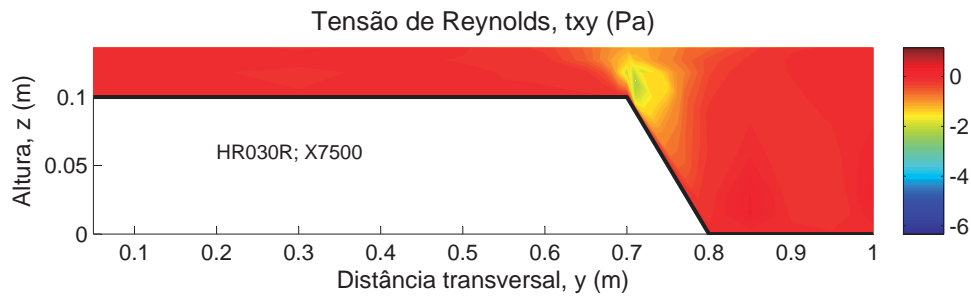


Figura 6.19: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso

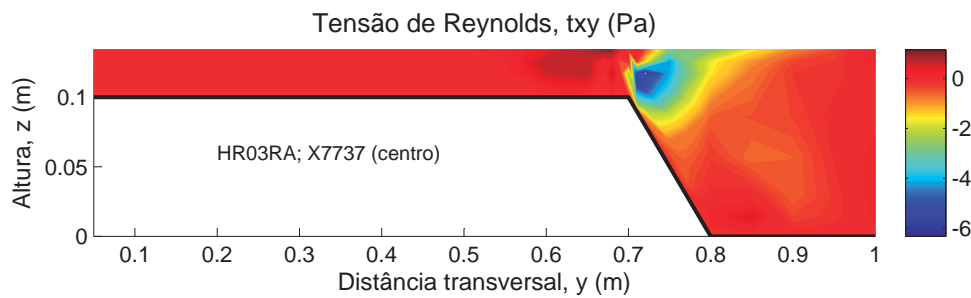


Figura 6.20: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

A maior parte da secção apresenta valores de tensões praticamente nulos, independentemente da configuração adoptada e da altura relativa. É de particular relevância, a zona de tensões negativas acentuadas na interface entre os leitos. No entanto, para a configuração com elementos verticais, as zonas de tensões máximas positivas também aparecem na zona da árvore e esta característica, tal como o que acontece na distribuição da velocidade, também é bastante diferente da observada para fundo rugoso. O facto de as zonas de tensões máximas positivas e negativas ocorrerem junto à interface, implica que $-\tau_{xy}$ torna-se zero junto ao elemento vertical, fazendo com que a transferência de quantidade de movimento entre os leitos seja suprimida pela presença das árvores emergentes.

HR015RA e HR020RA apresentam valores de tensões negativas semelhantes, mas para HR030RA o valor das tensões na interface duplica, pondo mais uma vez em evidência o facto de que é nesta altura de água que as árvores emergentes exercem mais influência sobre o escoamento. Tal como já se observou na distribuição transversal, HR015R e HR020R apresentam tensões na interface superiores em valor absoluto em comparação com HR015RA e HR020RA, respectivamente, ao contrário do que acontece para $h_r = 0,30$, cujo máximo ocorre para fundo rugoso com elementos verticais.

As Figuras 6.21, 6.22, 6.23, 6.24, 6.25 e 6.26 apresentam a distribuição das tensões de Reynolds verticais, τ_{xz} , para $h_r = 0,15$, $h_r = 0,20$ e $h_r = 0,30$, em fundo rugoso (HR015R, HR020R e HR030R) e em fundo rugoso com elementos verticais (HR015RA, HR020RA e HR030RA), respectivamente. As tensões máximas negativas estão sempre localizadas na interface. Isto significa que existem correntes ascendentes que estão a transmitir as velocidades mais baixas junto ao fundo, criando tensões tangenciais. As tensões positivas máximas junto ao fundo do leito principal correspondem a uma típica camada limite 2D. Comparando HR015R com HR015RA, as tensões são maiores para fundo rugoso. Para as outras duas alturas relativas verifica-se o contrário: HR020RA e HR030RA apresentam valores superiores a HR020R e HR030R. É de notar que é para $h_r = 0,15$ que as árvores exercem menos influência no escoamento.

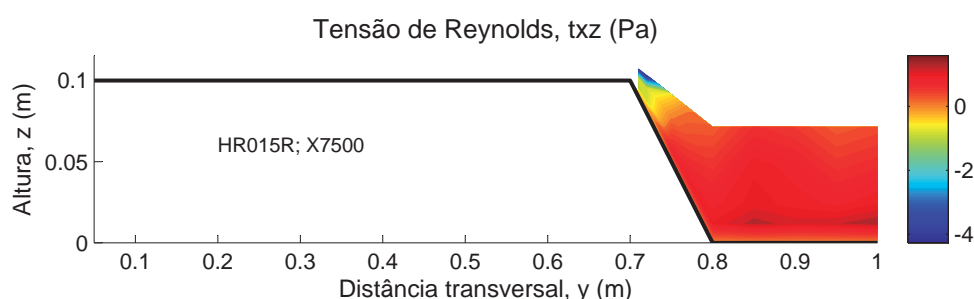


Figura 6.21: Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xz} - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso

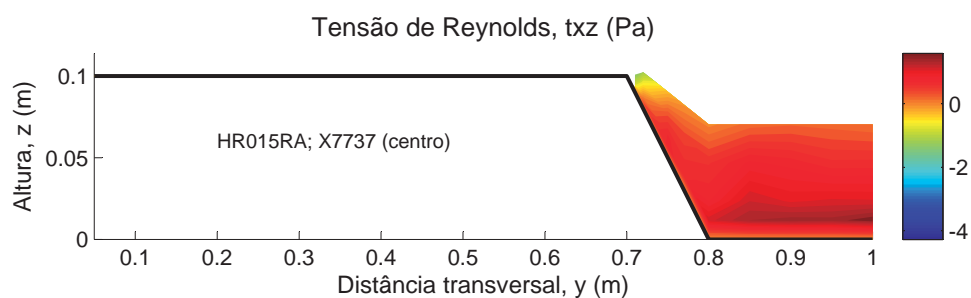


Figura 6.22: Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xz} - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

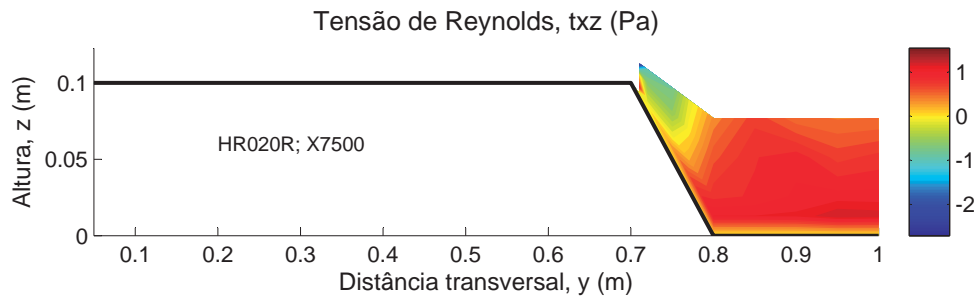


Figura 6.23: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso

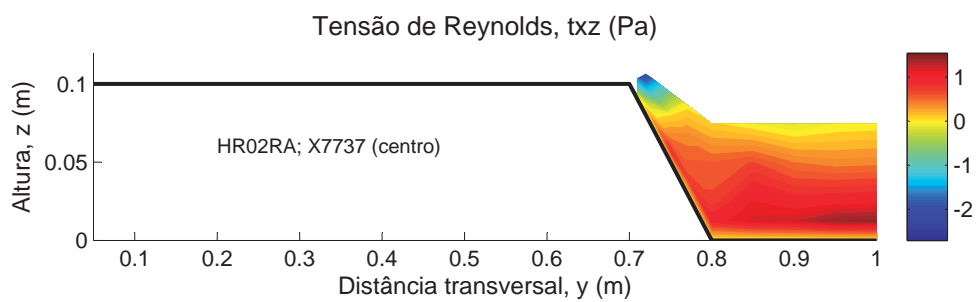


Figura 6.24: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

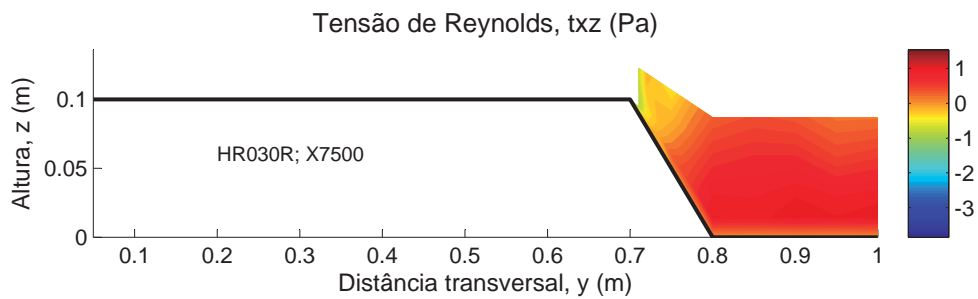


Figura 6.25: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso

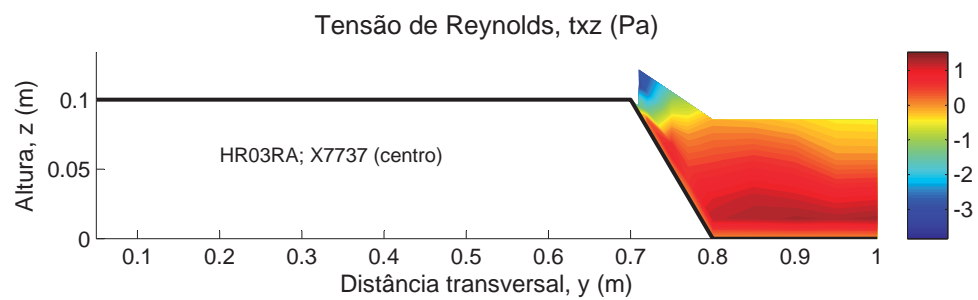


Figura 6.26: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

Por último, apresentam-se os resultados da flutuação da velocidade longitudinal, RMS_U , cuja distribuição transversal para as diferentes alturas de água é mostrada nas Figuras 6.27, 6.28 e 6.29. Mais uma vez, a flutuação da velocidade diz respeito à intensidade turbulenta. Assim, é expectável que o seu máximo ocorra na interface entre o leito principal e o leito de cheia, tal como se pode observar em todas as alturas relativas. Para a configuração com elementos verticais existem dois picos na interface, evidenciando o facto de que a velocidade diminui significativamente junto às árvores. Estes dois picos são tão mais visíveis quanto maior a altura relativa.

Para fundo rugoso a flutuação da velocidade diminuiu com o aumento da altura relativa. Contrariamente, para fundo rugoso com elementos a flutuação aumentou com o aumento da altura, pondo em evidência a influência da árvore sobre o escoamento, que é tanto maior quanto maior a altura relativa.

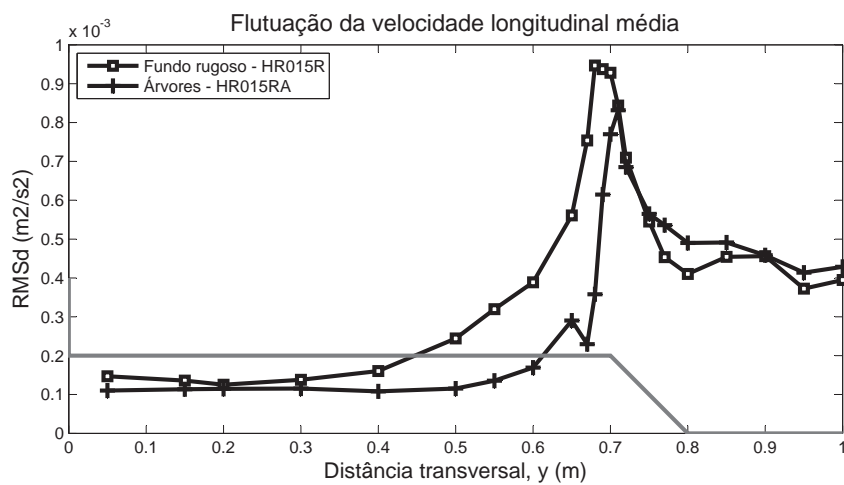


Figura 6.27: Distribuição transversal da flutuação da velocidade longitudinal $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com e sem árvores

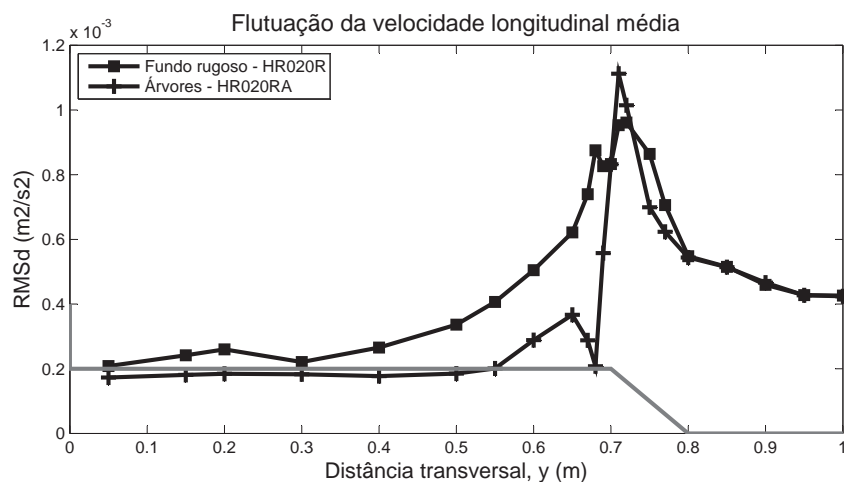


Figura 6.28: Distribuição transversal da flutuação da velocidade longitudinal $RMS_U - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com e sem árvores

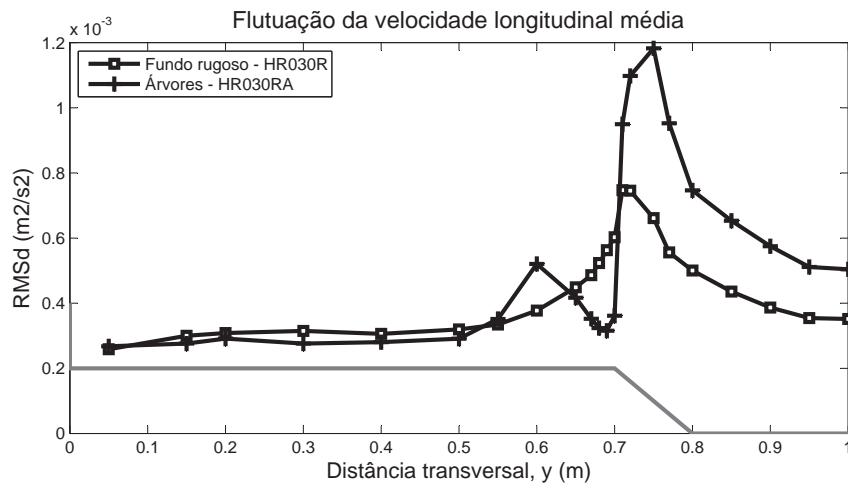


Figura 6.29: Distribuição transversal da flutuação da velocidade longitudinal $RMS_U - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com e sem árvores

A distribuição da flutuação da velocidade na secção transversal do canal experimental, nas mesmas condições dos resultados atrás mostrados, é apresentada nas Figuras 6.30, 6.31, 6.32, 6.33, 6.34 e 6.35.

Para as três alturas relativas e em ambas as configurações a flutuação máxima ocorre na interface. Para $h_r = 0, 15$ a flutuação máxima ocorre no fundo rugoso e não na configuração com elementos verticais como seria de esperar. Opostamente, para as duas alturas relativas mais elevadas, a flutuação máxima ocorre para fundo rugoso com árvores. Para o caso com os elementos verticais, os valores da flutuação aumentam com o aumento da altura relativa, apresentando assim o valor mais alto para HR030RA.

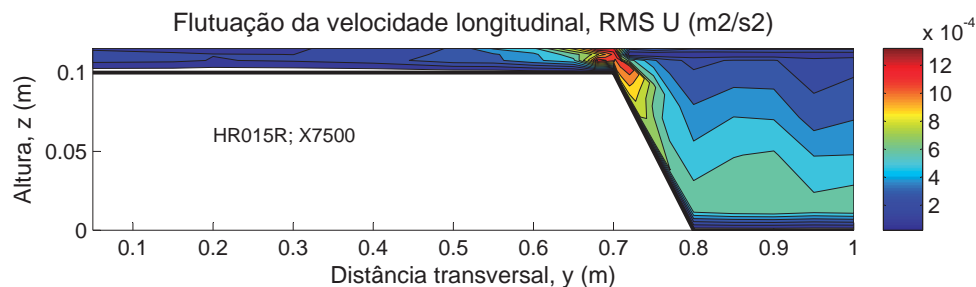


Figura 6.30: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso

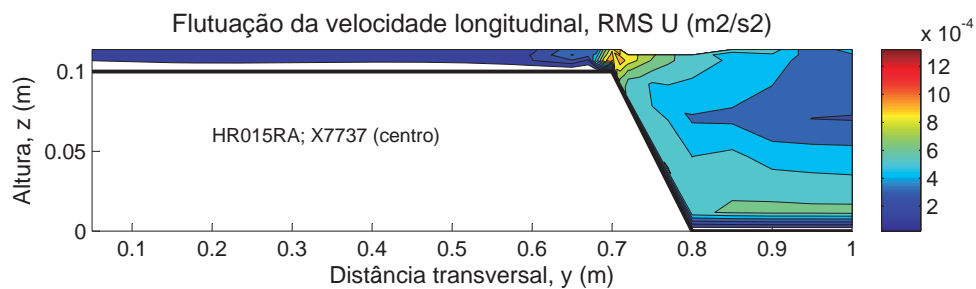


Figura 6.31: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

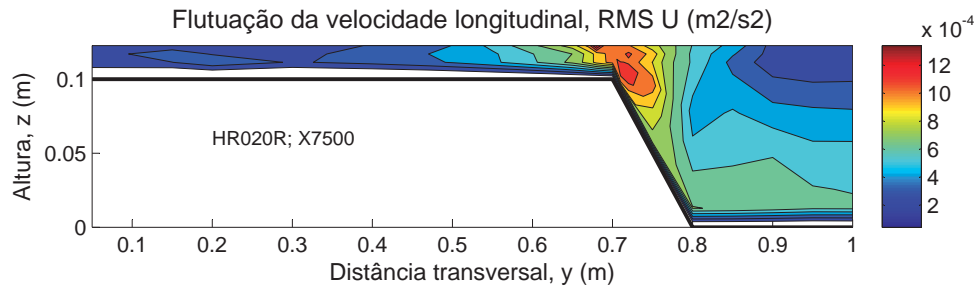


Figura 6.32: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso

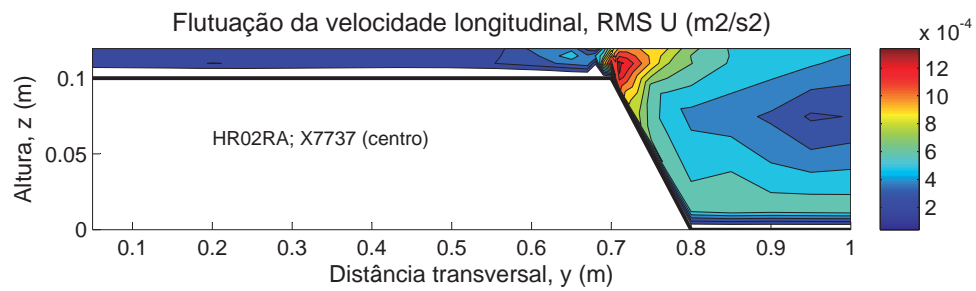


Figura 6.33: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

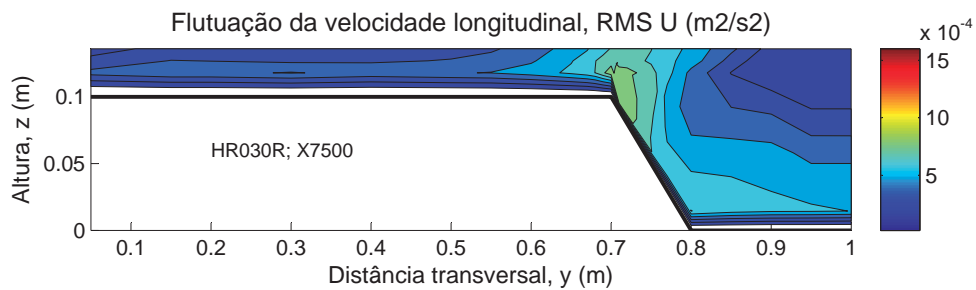


Figura 6.34: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso

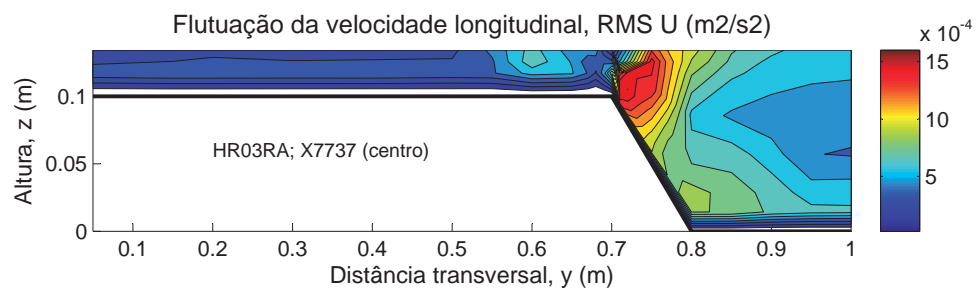


Figura 6.35: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

6.4 Influência da posição de medição na configuração com elementos verticais

6.4.1 Distribuição de velocidades

Esta secção tem como objectivo estudar a influência da posição de medição entre dois elementos verticais consecutivos. Deste modo, faz-se a comparação entre três posições de medição distintas - X7705, X7737 e X7769 - que tomam o nome de Montante, Centro e Jusante, respectivamente, de acordo com o definido na secção 3.4.

As Figuras seguintes apresentam a distribuição da velocidade longitudinal para as alturas relativas 0, 15 (cf. Figuras 6.36, 6.37 e 6.38), 0, 20 (cf. Figuras 6.40, 6.41 e 6.42) e 0, 30 (cf. Figuras 6.44, 6.45 e 6.46), onde se pode verificar que os resultados obtidos nas três posições de medição são idênticos, tanto na forma das isolinhas como nos valores obtidos. Nas Figuras 6.39, 6.43 e 6.47, onde está apresentada a distribuição transversal da velocidade média em profundidade para cada altura relativa, é mais uma vez possível verificar que os resultados são extremamente parecidos.

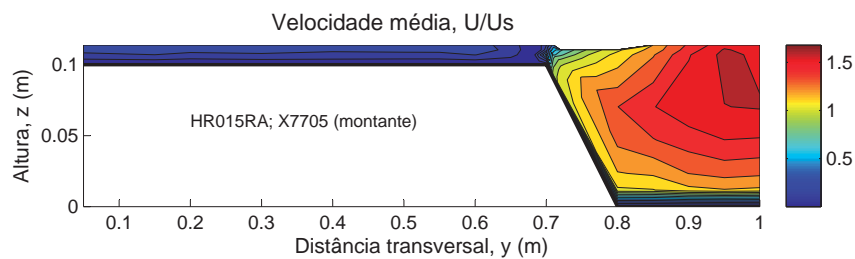


Figura 6.36: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

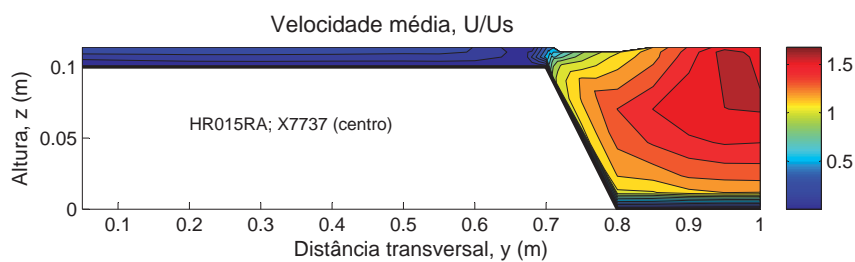


Figura 6.37: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

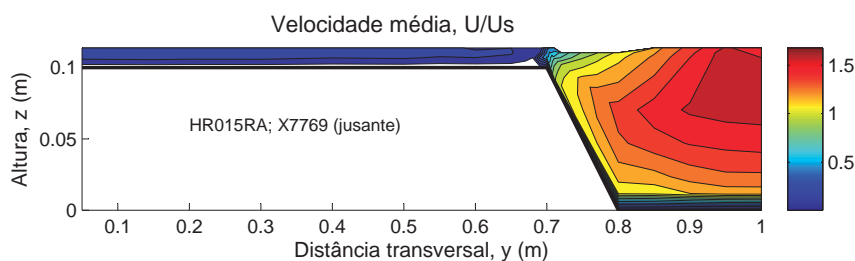


Figura 6.38: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

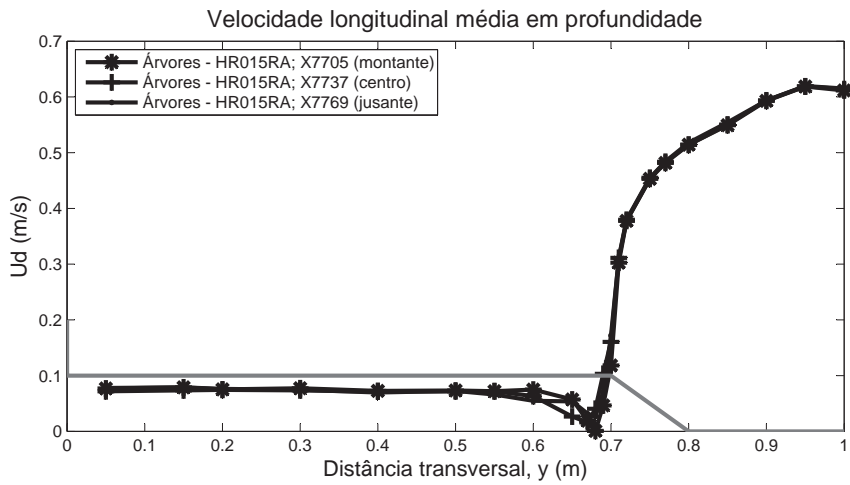


Figura 6.39: Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais

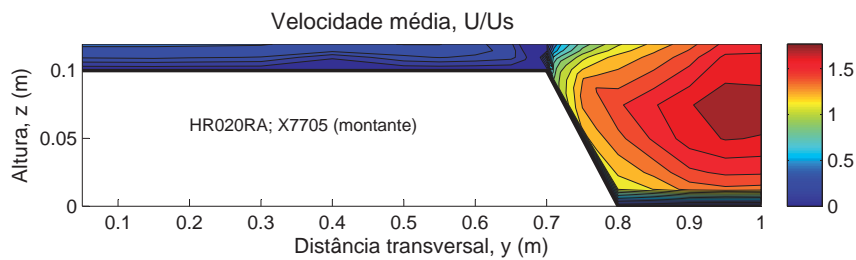


Figura 6.40: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

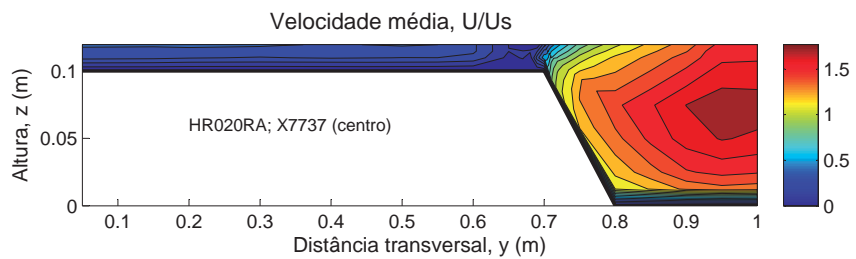


Figura 6.41: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

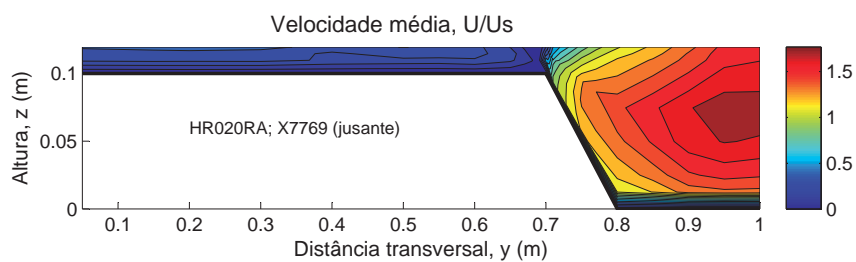


Figura 6.42: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

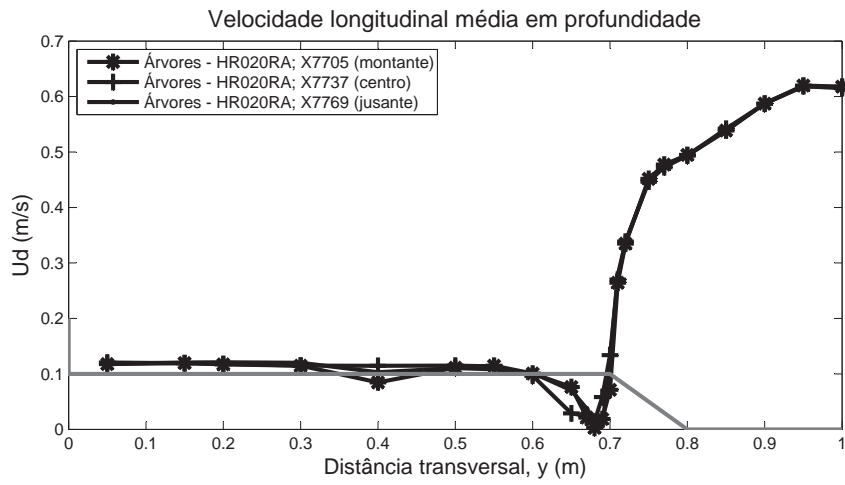


Figura 6.43: Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais

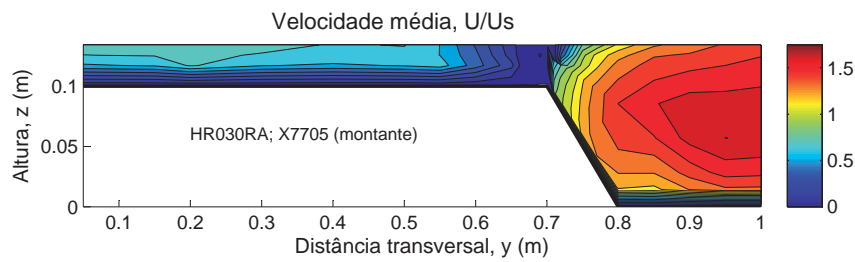


Figura 6.44: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

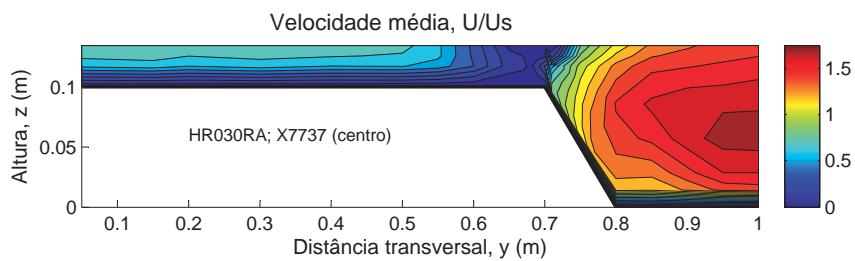


Figura 6.45: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

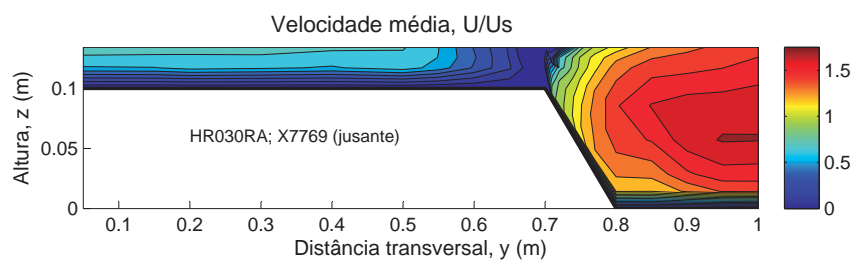


Figura 6.46: Distribuição da velocidade U/U_s média no tempo - $h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

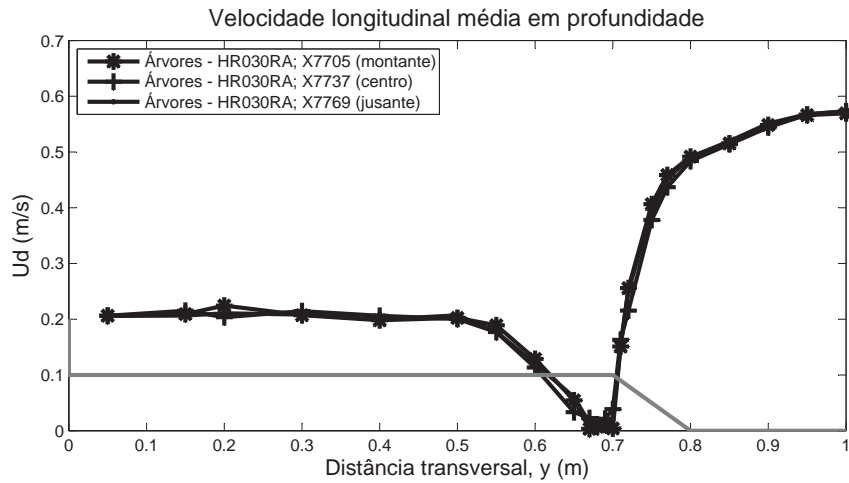


Figura 6.47: Distribuição transversal da velocidade longitudinal média em profundidade - $h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais

6.4.2 Distribuição das tensões de Reynolds

As Figuras seguintes apresentam a distribuição das tensões de Reynolds horizontais, τ_{xy} , para as alturas relativas 0,15 (cf. Figuras 6.48, 6.49 e 6.50), 0,20 (cf. Figuras 6.52, 6.53 e 6.54) e 0,30 (cf. Figuras 6.56, 6.57 e 6.58), onde se pode verificar que os resultados obtidos nas três posições de medição são semelhantes, tanto na forma das isolinhas como nos valores obtidos.

Para $h_r = 0,15$ e $h_r = 0,30$, é a medição a montante que tem o comportamento mais distinto, já que as zonas de tensões máximas positivas e negativas na interface são mais esbatidas, em comparação com as medições ao centro e a jusante que apresentam valores de tensões superiores. Em ambas as alturas relativas, o efeito da supressão da transferência de quantidade de movimento é mais evidente na medição ao centro.

Para $h_r = 0,20$, o efeito da supressão da transferência de quantidade de movimento também é mais evidente na medição ao centro. As medições a montante e a jusante apresentam comportamentos idênticos e os seus valores são menores do que a medição ao centro.

Sobrepondo os perfis das tensões médias em profundidade para as três posições de medição e alturas relativas (cf. Figuras 6.51, 6.55 e 6.59) estas diferenças entre as medições a montante, centro e jusante tornam-se evidentes.

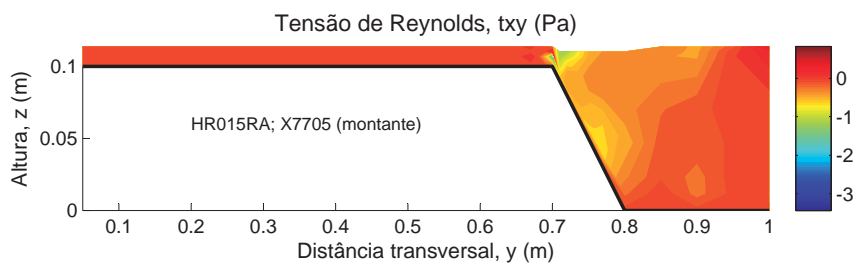


Figura 6.48: Distribuição das tensões de Reynolds τ_{xy} - $h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

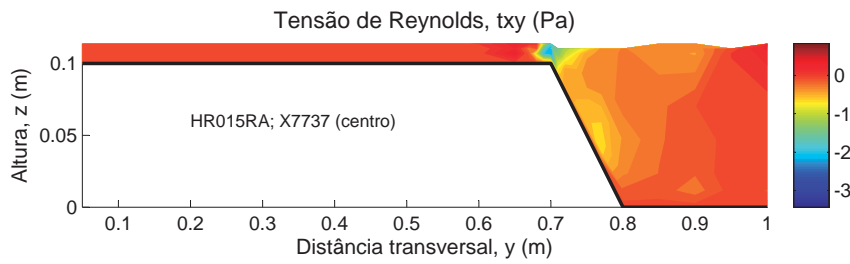


Figura 6.49: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

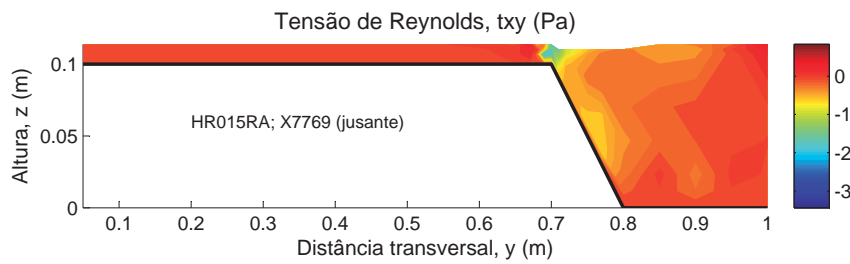


Figura 6.50: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

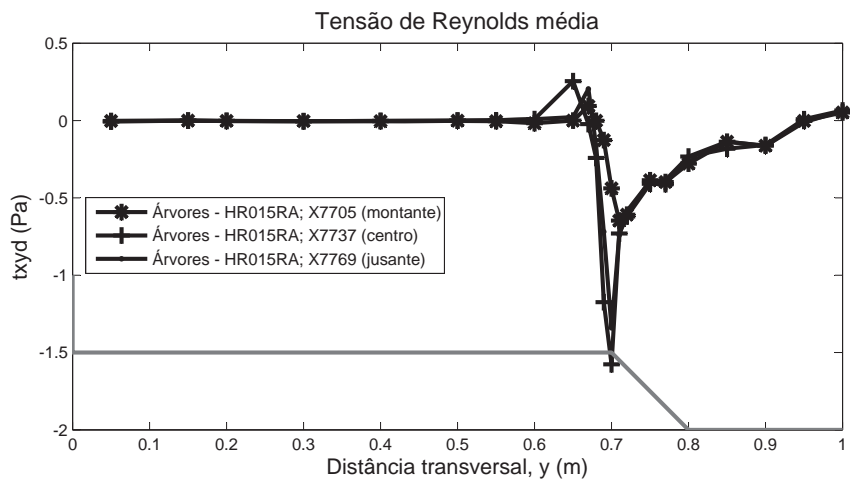


Figura 6.51: Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais

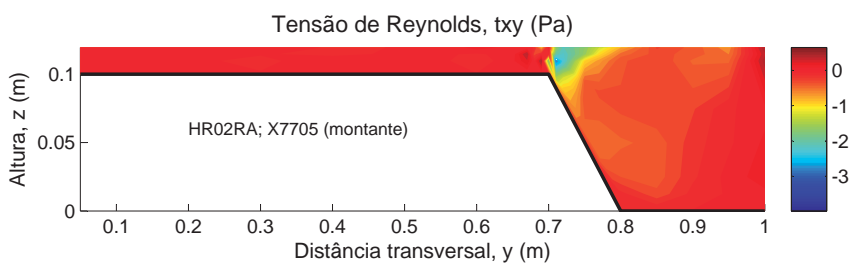


Figura 6.52: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

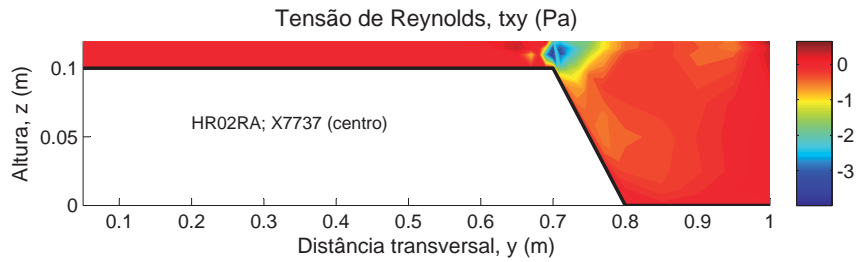


Figura 6.53: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

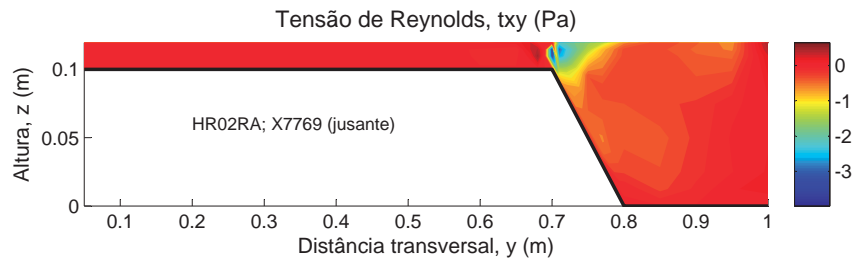


Figura 6.54: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

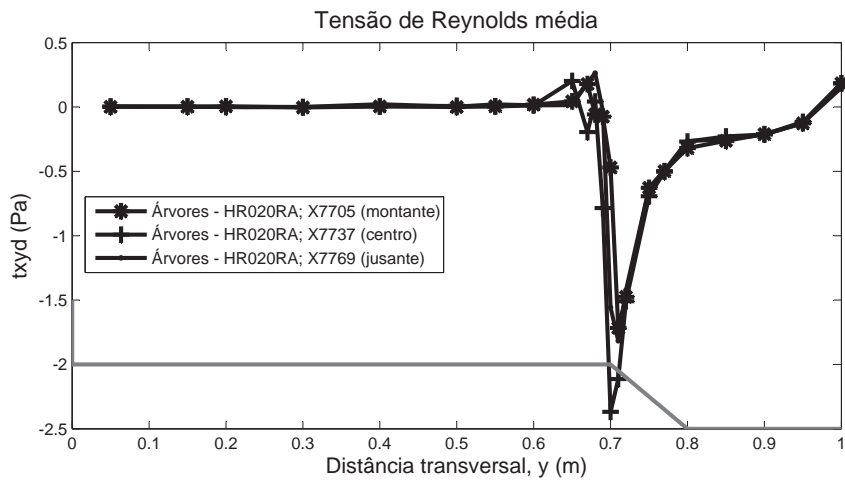


Figura 6.55: Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais

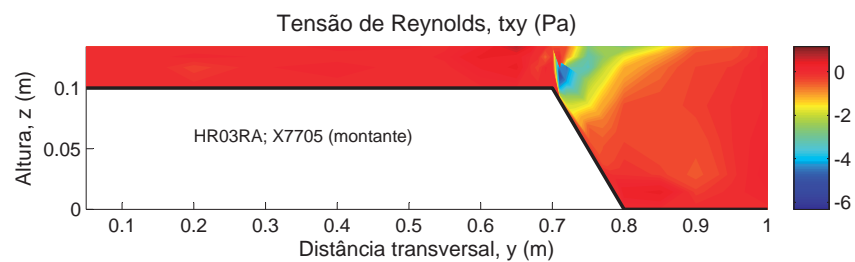


Figura 6.56: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

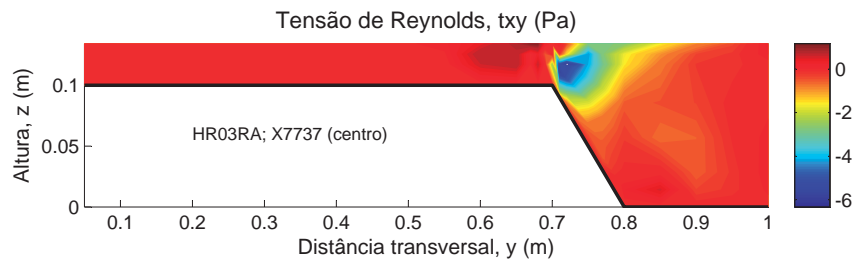


Figura 6.57: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

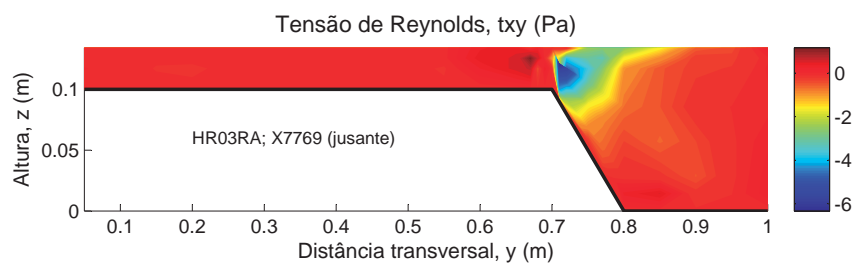


Figura 6.58: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

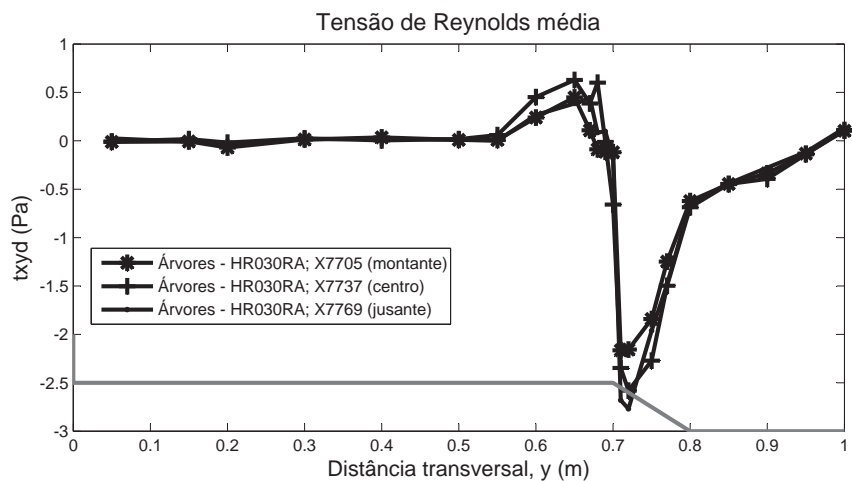


Figura 6.59: Distribuição transversal das tensões de Reynolds $\tau_{xy} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais

As Figuras seguintes apresentam a distribuição das tensões de Reynolds verticais, τ_{xz} , para as alturas relativas 0, 15 (cf. Figuras 6.60, 6.61 e 6.62), 0, 20 (cf. Figuras 6.63, 6.64 e 6.65) e 0, 30 (cf. Figuras 6.66, 6.67 e 6.68), onde se pode verificar que os resultados obtidos nas três posições de medição são idênticos, tanto na forma das isolinhas como nos valores obtidos, não havendo assim nenhum comportamento distinto a assinalar.

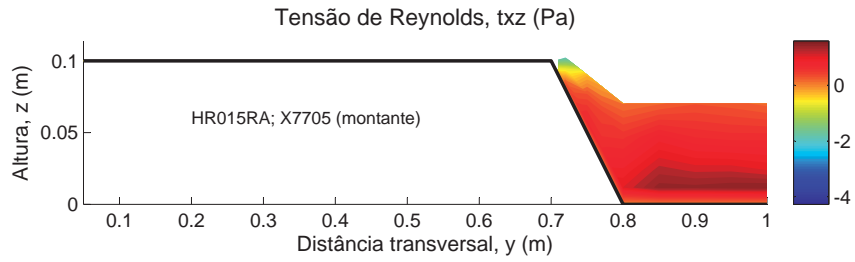


Figura 6.60: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

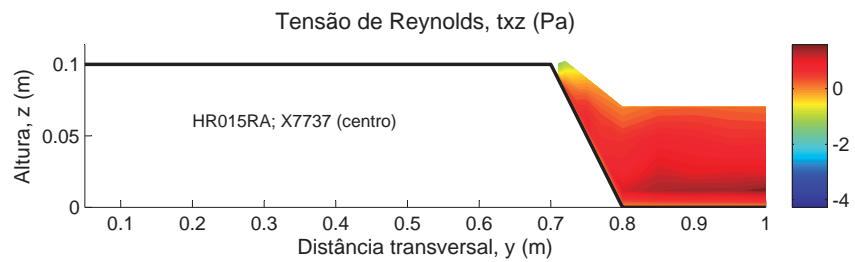


Figura 6.61: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

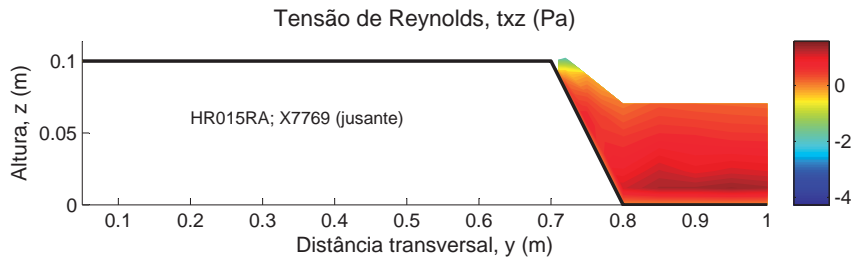


Figura 6.62: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

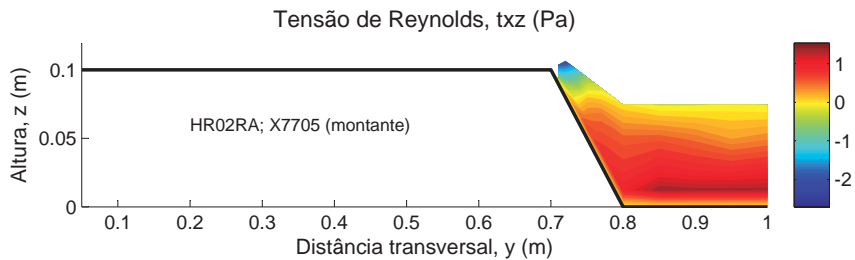


Figura 6.63: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

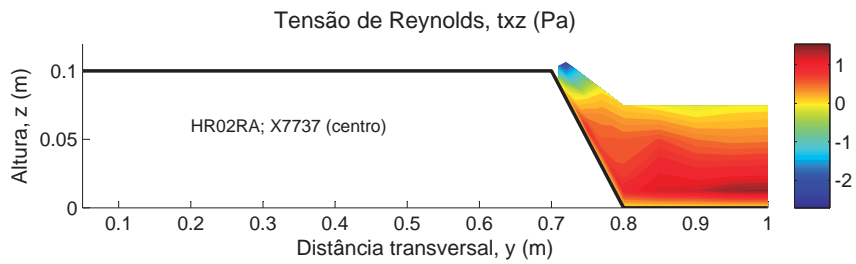


Figura 6.64: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

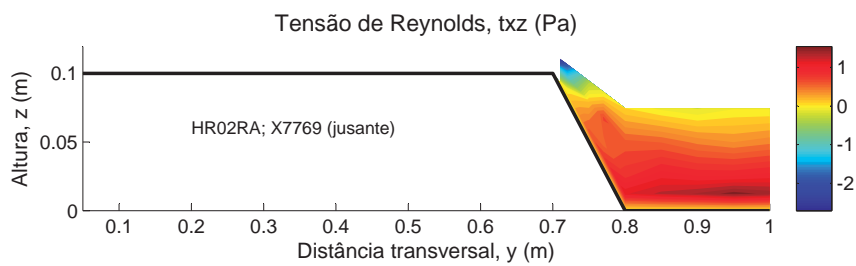


Figura 6.65: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

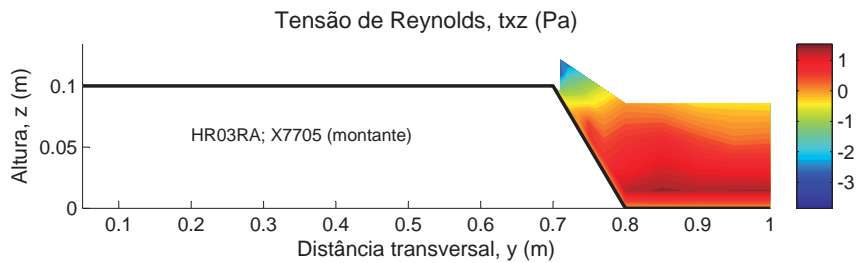


Figura 6.66: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

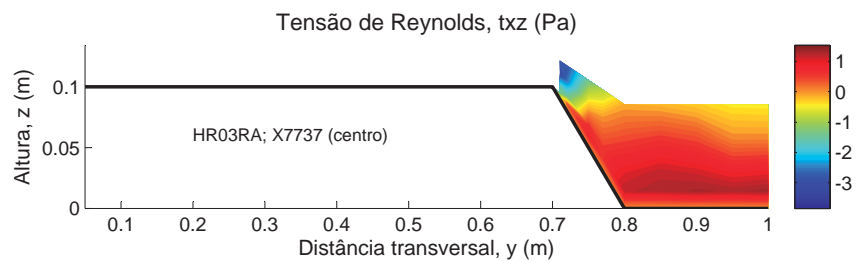


Figura 6.67: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

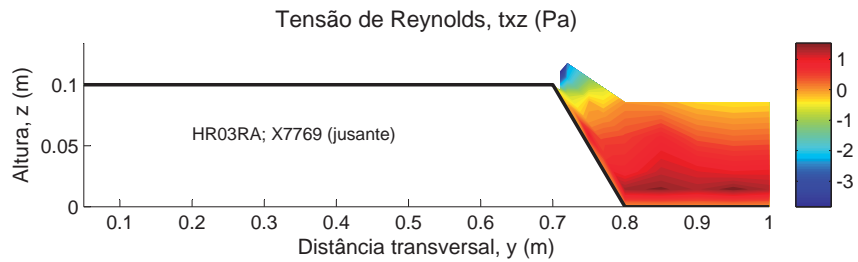


Figura 6.68: Distribuição das tensões de Reynolds $\tau_{xz} - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

Por último, apresentam-se os resultados da flutuação da velocidade longitudinal, RMS_U , para as alturas relativas 0, 15 (cf. Figuras 6.69, 6.70 e 6.71), 0, 20 (cf. Figuras 6.73, 6.74 e 6.75) e 0, 30 (cf. Figuras 6.77, 6.78 e 6.79), onde se pode verificar que os resultados obtidos nas três posições de medição são idênticos, tanto na forma das isolinhas como nos valores obtidos, apresentado apenas a medição a montante para $h_r = 0,15$ valores mais baixos na interface.

Mais uma vez, sobrepondo os perfis da flutuação média em profundidade para as três posições de medição e alturas relativas (cf. Figuras 6.72, 6.76 e 6.80) é possível verificar que os resultados são semelhantes.

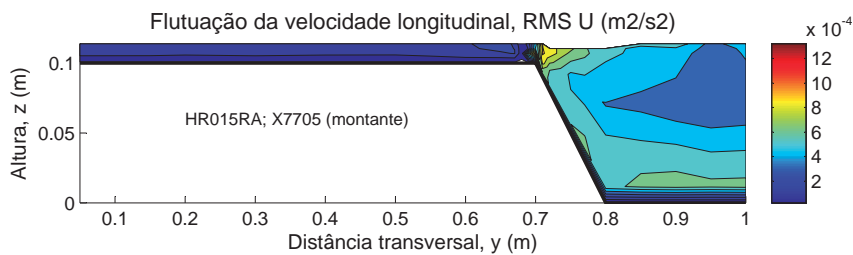


Figura 6.69: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

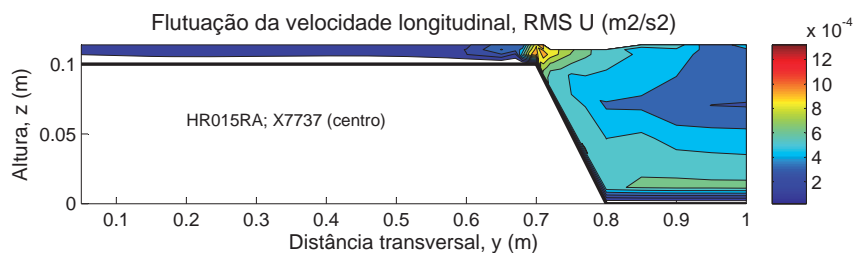


Figura 6.70: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

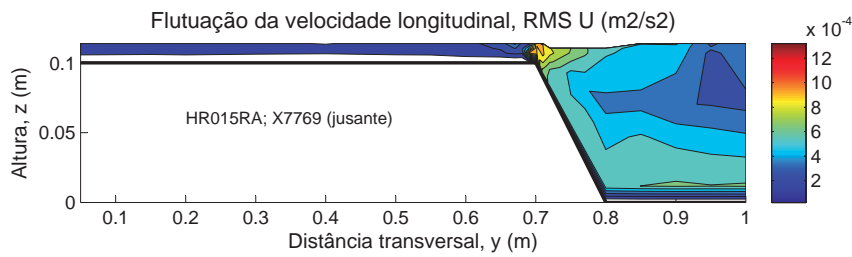


Figura 6.71: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

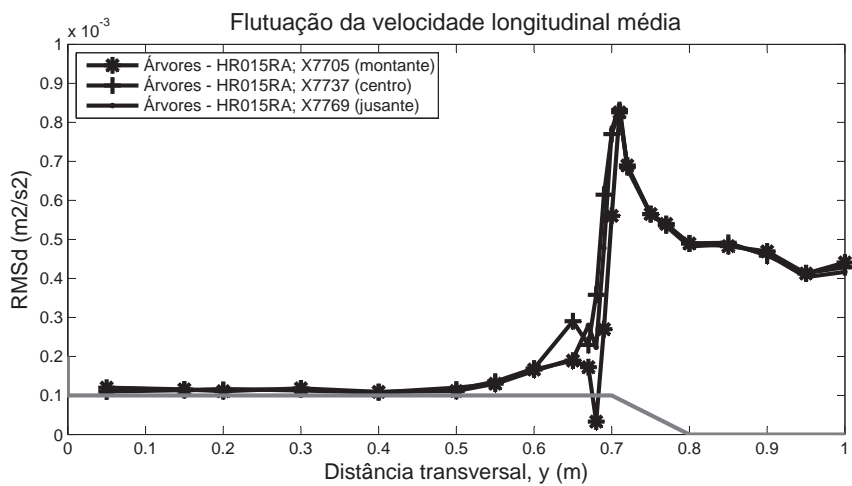


Figura 6.72: Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,15$ em fundo rugoso com elementos verticais

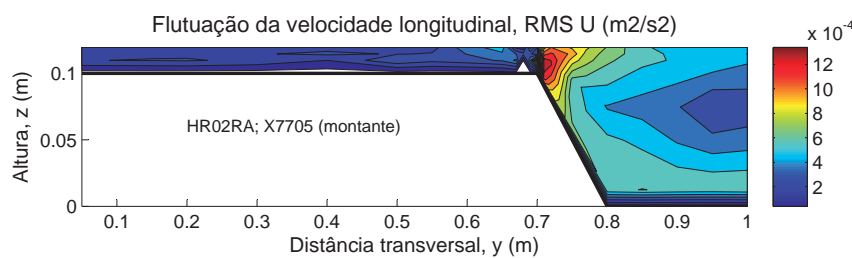


Figura 6.73: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

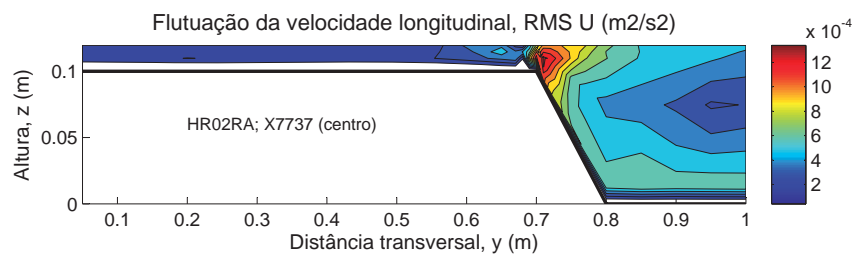


Figura 6.74: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,20$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

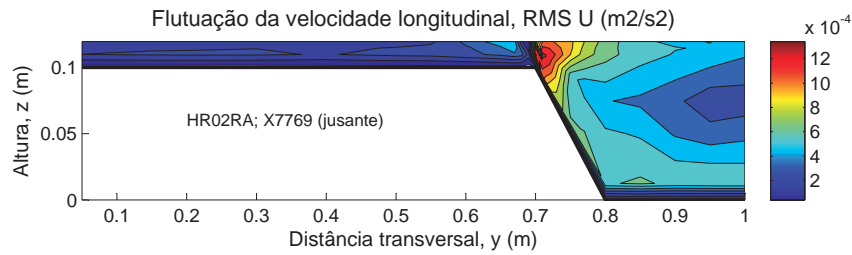


Figura 6.75: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS U - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

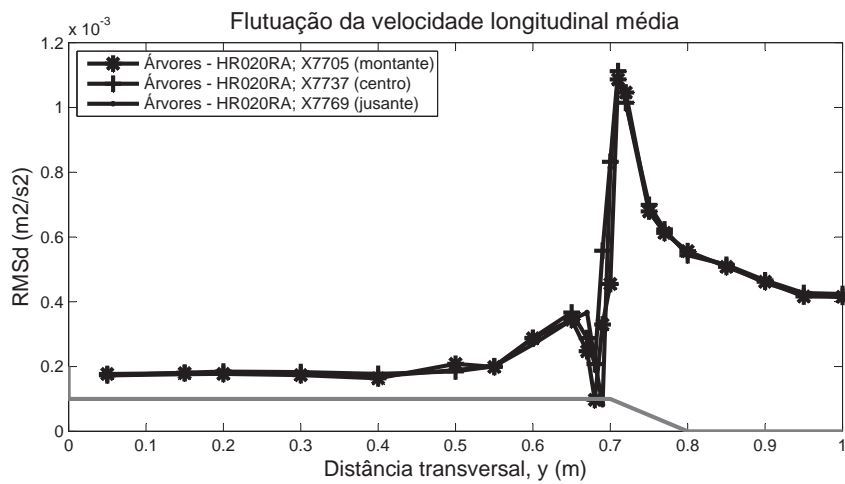


Figura 6.76: Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS U - h_r = 0, 20$ em fundo rugoso com elementos verticais

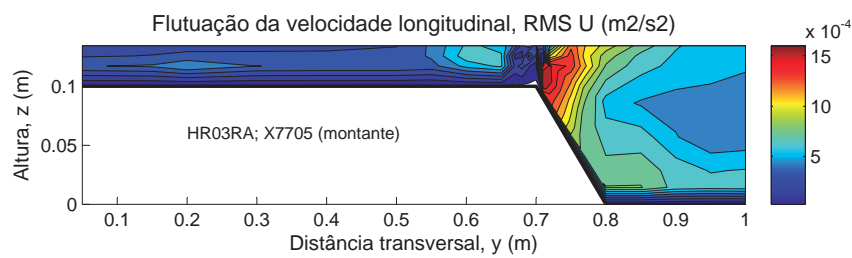


Figura 6.77: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS U - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (montante, X7705)

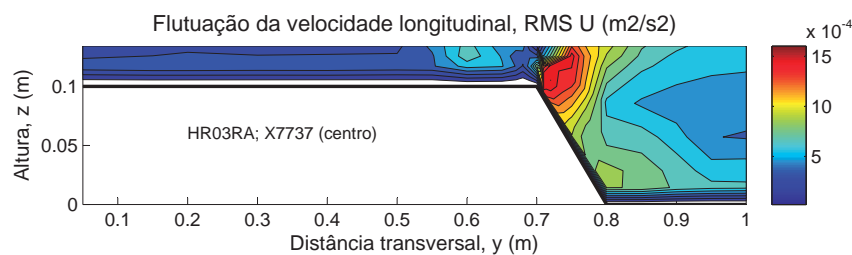


Figura 6.78: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS U - h_r = 0, 30$ em fundo rugoso com elementos verticais (centro, X7737)

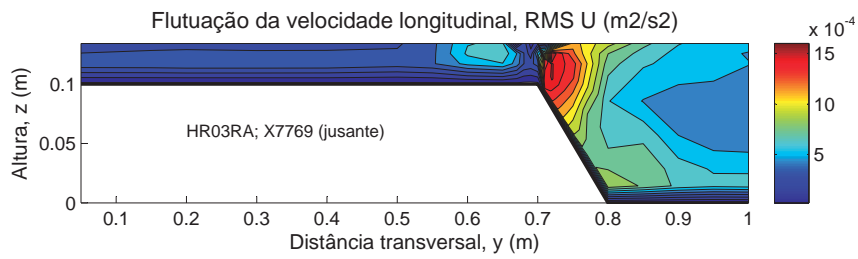


Figura 6.79: Distribuição da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais (jusante, X7769)

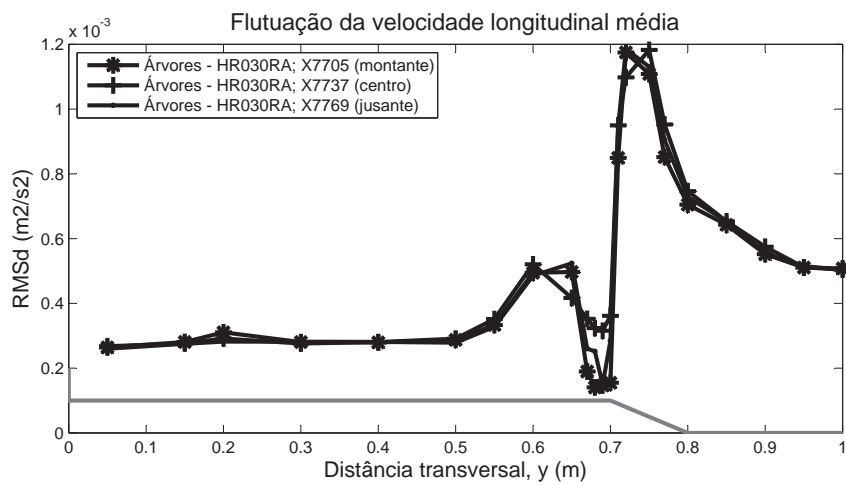


Figura 6.80: Distribuição transversal da flutuação da velocidade $RMS_U - h_r = 0,30$ em fundo rugoso com elementos verticais

Capítulo 7

Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros

7.1 Conclusões

A presente dissertação teve como principal objectivo investigar experimentalmente o modo como a rugosidade e os elementos verticais nos leitos de cheia influenciam a estrutura do escoamento em canais com secção composta. Para uma melhor compressão deste tema foram também analisados resultados obtidos em fundo liso.

Por este ser um estudo experimental podem ocorrer erros de medição, devido às limitações dos equipamentos, deficiente manutenção ou por manuseamento incorrecto dos instrumentos. Deste modo, durante a análise dos resultados foi tido espírito crítico em relação a qualquer desvio nítido dos dados recolhidos, analisando-se a distribuição temporal de cada medição no *software WinADV* sempre que surgiram dúvidas. Como se viu, este processo levou à não consideração de alguns pontos.

Apresentaram-se os dados relativos à velocidade longitudinal e respectiva componente de flutuação. As tensões de Reynolds horizontais e verticais foram calculadas e também apresentadas. Para fundo liso e fundo rugoso estes dados foram recolhidos na secção X7500. Para a configuração com elementos verticais foram efectuadas medições em três posições diferentes entre duas árvores consecutivas, aproximadamente na secção X7700, para um estudo mais aprofundado.

Os resultados obtidos para fundo liso e fundo rugoso permitiram tirar as seguintes conclusões:

- Para as duas alturas relativas estudadas, a passagem de fundo liso para fundo rugoso levou à diminuição da velocidade em ambos os leitos, em consequência a capacidade de vazão do canal diminuiu com a introdução da rugosidade.
- Para fundo rugoso, o escoamento mais lento no leito de cheia teve um efeito retardador no escoamento do leito principal, fazendo com que as isolinhas recuem no sentido do leito principal junto à superfície. A curvatura das isolinhas na zona da interface indica a presença de estrutura turbulenta com intensidade significativa.
- Para ambas as alturas relativas, as tensões de Reynolds τ_{xy} atingiram o máximo em valor absoluto na interface e na restante parte do canal os valores das tensões são praticamente nulos. Deste

resultado conclui-se que vórtices de eixo vertical, quando acompanhados de elevadas tensões de Reynolds, provocam significativas transferências de quantidade de movimento entre a elevada velocidade no leito principal e a baixa velocidade no leito de cheia. Verificou-se, ainda, que a região de maiores tensões se estendeu na diagonal na direcção do leito principal, o que significa que na interface a zona de maior interacção afastou-se progressivamente da superfície livre.

- A introdução da rugosidade gerou um maior gradiente lateral de velocidades, o que levou ao aumento dos valores das tensões τ_{xy} face ao verificado para fundo liso.
- Para fundo liso, as tensões τ_{xy} diminuíram com o aumento da altura relativa, apontando para uma interacção turbulenta menor. O mesmo não se verificou para fundo rugoso, pois as tensões aumentaram com o aumento da altura de água, pondo em evidência o facto de que a turbulência adicional gerada pela relva é mais preponderante do que o aumento da altura.
- Em ambas as configurações e alturas de água, as tensões de Reynolds τ_{xz} negativas estão localizadas na interface entre os leitos, o que significa que existem correntes ascendentes que estão a transmitir as velocidades mais baixas junto ao fundo, criando tensões tangenciais. As tensões positivas máximas observadas junto ao fundo do leito principal correspondem a uma típica camada limite 2D. Tanto para fundo liso como para fundo rugoso, as tensões verticais diminuíram com o aumento da altura relativa.
- Verificou-se que o máximo da flutuação da velocidade longitudinal ocorreu sempre na interface entre o leito principal e o leito de cheia. Para $h_r = 0,15$ a intensidade turbulenta diminuiu com a introdução da rugosidade, mas para $h_r = 0,20$ aumentou.
- O *Single Channel Method*, SCM, demonstrou ser pouco representativo da realidade, tendo subestimado a capacidade de vazão do canal, tanto para fundo liso como para fundo rugoso. O *Divided Channel Method*, DCM, apresentou resultados mais satisfatórios, ainda que sobrestimados.

Os resultados obtidos para fundo rugoso e para fundo rugoso com elementos verticais permitiram tirar as seguintes conclusões:

- Para as três alturas relativas estudadas, a introdução dos elementos verticais levou à diminuição da velocidade em ambos os leitos, em consequência a capacidade de vazão do canal diminuiu.
- Para todas as alturas relativas, o perfil transversal da velocidade média em profundidade para fundo rugoso tem uma forma aproximadamente em "S" e para leitos de cheia rugosos com elementos verticais uma forma em "V". Isto deve-se ao facto de que a velocidade do escoamento diminui localmente na zona da árvore.
- Na configuração com os elementos, a presença da árvore emergente teve um efeito retardador no escoamento do leito principal, o que fez com que as isolinhas recuassem no sentido do leito principal, característica tão mais visível quanto maior a altura relativa. Consequentemente, com o aumento da altura de água a velocidade máxima deslocou-se progressivamente para o centro do leito principal, ao contrário do verificado para fundo rugoso, onde a velocidade máxima ocorre à superfície.

- Independentemente da altura relativa e configuração, as tensões de Reynolds τ_{xy} atingiram o pico negativo na interface e na restante parte do canal apresentaram valores praticamente nulos. Para leitos de cheia rugosos com elementos verticais, além da zona negativa de tensões, verificou-se a co-existência de uma zona de tensões positiva imediatamente atrás da árvore. Em consequência, a transferência de quantidade de movimento entre o leito principal e o leito de cheia foi suprimida pela presença das árvores emergentes.
- O perfil das tensões τ_{xy} médias em profundidade apresentaram um pico na interface para fundo rugoso nas três alturas relativas. Para a configuração com elementos verticais, a tensão apresentou dois picos na interface, em consequência da existência das zonas positivas e negativas de tensões na zona das árvores.
- A presença das árvores emergentes, em comparação com fundo rugoso, só levou ao aumento das tensões horizontais para a maior altura relativa. Para $h_r = 0,15$ e $h_r = 0,20$, a introdução das árvores levou à diminuição das tensões na zona da interface.
- Para todas as alturas relativas e para ambas as configurações, as tensões de Reynolds τ_{xz} negativas estão significativamente concentradas na zona da interface e as positivas encontram-se praticamente junto ao fundo do leito principal, o que corresponde a uma típica camada limite 2D. Para a altura relativa em que as árvores exercem menos influência sobre o escoamento, as tensões apresentaram maiores valores para fundo rugoso. Para as alturas relativas 0,20 e 0,30, as tensões apresentaram-se mais elevadas para a configuração com árvores.
- Para fundo rugoso e em todas as alturas relativas, a flutuação da velocidade longitudinal RMS_U apresentou o valor máximo na interface entre o leito principal e o leito de cheia. Para a configuração com elementos verticais verificou-se a existência de dois picos na interface, evidenciando o facto de que a velocidade diminuiu significativamente junto às árvores. Estes dois picos são tão mais visíveis quanto maior a altura relativa.
- Para fundo rugoso a flutuação da velocidade diminuiu com o aumento da altura relativa. Contrariamente, para fundo rugoso com elementos a flutuação aumentou com o aumento da altura, pondo em evidência a influência da árvore sobre o escoamento, que é tanto maior quanto maior a altura relativa.
- Com a introdução dos elementos verticais, a flutuação da velocidade aumentou para $h_r = 0,20$ e $h_r = 0,30$. No entanto, para a menor altura de água, o máximo da flutuação ocorreu para fundo rugoso. Para o caso com os elementos verticais, os valores da flutuação aumentaram com o aumento da altura relativa.

Relativamente à configuração com elementos verticais, as três posições de medição efectuadas entre duas árvores consecutivas no geral revelaram ser semelhantes, não havendo, assim, diferenças significativas a assinalar. Uma vez que os resultados são idênticos, sugere-se que as medições sejam efectuadas no centro de duas árvores, na medida em que esta medição não necessita que o *Vectrino* seja invertido, tornando os ensaios menos morosos.

7.2 Sugestões para desenvolvimentos futuros

A área científica na qual se insere a presente dissertação possui inúmeras abordagens e distintos caminhos por onde se pode envergar. Aumentar o conhecimento sobre o tema e os fenômenos nele envolvidos, será sempre benéfico para a comunidade científica, pelo que se sugere:

- Alteração do diâmetro da copa e do tronco dos elementos verticais.
- Alteração do espaçamento entre elementos verticais, de modo a diminuir ou aumentar a densidade de árvores.
- Estudo de regimes não uniformes.

Bibliografia

1. BERZ, G. (2000) - *Flood disasters: lessons from the past - worries for the future*. Proceedings of the 28th Congress of IAHR, Post congress volume, Graz, Austria, págs. 9-16.
2. BOUSMAR, D.; RIVIÈRE, N.; PROUST, S.; PAQUIER, A.; MOREL, R.; ZECH, Y. (2005) - *Upstream discharge distribution in compound-channels flumes*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 131, págs. 408-412.
3. BOUSMAR, D.; ZECH, Y. (1999) - *Momentum transfer for practical flow computation in compound channels*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 125, págs. 696-706.
4. Directiva 2007/60/CE do PARLAMENTO EUROPEU E DO CONCELHO DA UNIÃO EUROPEIA - Jornal Oficial da União Europeia, 23 de Outubro de 2007.
5. DUARTE, P. (2011) - *Influência da rugosidade das planícies de inundação na capacidade de vazão de rios*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Perfil de Construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica. 116 págs.
6. FERREIRA, M.; AGUIAR, F.; NOGUEIRA, C. (2005) - *Changes in riparian woods over space and time: influence of environment and land use*. Forest Ecology and Management, Volume 212, págs. 145-159.
7. GORING, D.; NIKORA, V. (2002) - *Despiking acoustic Doppler velocimeter data*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 128, págs. 117-126.
8. HUBBLE, T.; DOCKER, B.; RUTHERFURD, I. (2010) - *The role of riparian trees in maintaining riverbank stability: a review of Australian experience and practice*. Ecological Engineering, Volume 36, 3ª Edição, págs. 292-304.
9. KNIGHT, D. (2001) - *Conveyance in 1-D River Models-Scoping Study on Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance*. Relatório da Universidade de Birmingham.
10. LENCASTRE, A. (1996) - *Hidráulica geral*. Edição do Autor.
11. LENCASTRE, A.; FRANCO, F. (2006) - *Lições de hidrologia*. Fundação FCT, Caparica, 3ª Edição, págs. 284 e 285.
12. MASSA, P. (2011) - *Influência da rugosidade dos leitos de cheia em escoamentos em canais de secção composta*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Perfil de Construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica. 176 págs.
13. MASSEY, B. (2002) - *Mecânica dos Fluidos*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 6ª Edição, págs. 280-283, 423-429 e 607-641.

14. MYERS, W.; LYNESS, J.; CASSELLS, J. (2001) - *Influence of boundary roughness on velocity and discharge in compound river channels*. Journal of Hydraulic Research, Volume 39, Número 3.
15. NEZU, I. (1994) - *Compound open-channel turbulence and its role in river environment: significance of secondary currents*. Department of Civil and Global Environment Engineering, Kyoto University, Japan.
16. NEZU, I.; ONITSUKA, K.; IKETANI, K. (1999) - *Coherent horizontal vortices in compound open channel flows*. Department of Civil and Global Environment Engineering, Kyoto University, Japan.
17. Nortek AS (2009) - *Vectrino Velocimeter User Guide*. Noruega, Nortek.
18. PINTO, D. (2010) - *Caracterização experimental de escoamentos em canais de secção composta*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Perfil de Construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica. 113 págs.
19. PROOIJEN, B.; BATTJES, J.; UIJTTEWAAL, W. (2005) - *Momentum Exchange in straight uniform compound channel flow*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 131, págs. 175-183.
20. QUINTELA, A. (2007) - *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 10ª Edição, págs. 80-85.
21. ROUSSEEUW, J. (1998) - *Robust estimation and identifying outliers*. Handbook of statistical methods for engineers and scientists, 2ª Edição, McGraw-Hill, New York, págs. 17.1-17.15.
22. SANJOU, M.; NEZU, I.; SUZUKI, S.; ITAI, K. (2010) - *Turbulence structure of compound open-channel flows with one-line emergent vegetation*. Journal of Hydrodynamics, Volume 22, págs. 577-581.
23. SANJOU, M.; NEZU, I. (2011) - *Turbulence structure and concentration exchange property in compound open-channel flows with emergent trees on the floodplain edge*. International Journal of River Basin Management, Volume 9, Números 3 e 4, págs. 181-193.
24. SELLIN, R. (1964) - *A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its floodplain*. La Houille Blanche, Volume 7, págs. 793-802.
25. SHAMES, I. (1982) - *Mecânica dos fluidos: análise de escoamentos*. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil, Volume 2, 4ª Edição, págs. 316-319.
26. SHAMSELDIN, A. (2010) - *Artificial neural network model for river flow forecasting in a developing country*. Journal of Hydroinformatics, Volume 12.1, págs. 22-35.
27. SHIONO, K.; KNIGHT, D. (1991) - *Turbulent open channel flows with variable depth across the channel*. Journal of Fluid Mechanics, Volume 222, págs. 617-646.
28. SHIONO, K.; ISHIGAKI, T.; KAWANAKA, R.; HEATLIE, F. (2009) - *Influence of one line vegetation on stage-discharge rating curves in compound channel*. 33rd International Association of Hydraulics Engineering & Research Congress: Water Engineering for a sustainable Environment.
29. STREETER, V.; WYLIE, E. (1982) - *Mecânica dos fluidos*. McGraw-Hill, São Paulo, Brasil, 7ª Edição, págs. 206-210, 221-229.

30. SUN, X.; SHIONO, K. (2009) - *Flow resistance of one-line emergent vegetation along the floodplain edge of a compound channel*. Advances in Water Resources, Volume 32, págs. 430-438.
31. TERRIER, B. (2010) - *Flow Characteristics in Straight Compound Channels with Vegetation along the Main Channel*. Ph.D. thesis, Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, Reino Unido. 352 págs.
32. TUNG, Y. (2005) - *Flood defense systems design by risk-based approaches*. Water International, Volume 30, Número 1, págs. 50-57.
33. WAHL, T. (2002) - *Discussion of "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data" by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 128, Número 1, págs. 117-126.
34. YANG, K.; CAO, S.; KNIGHT, D. (2007) - *Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains*. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 133, Número 2, págs. 148-159.

Recursos online:

1. NORTEK AS, <http://www.nortek.no>
2. CNN, <http://news.blogs.cnn.com/2011/01/05/world-update-massive-flooding-in-australia-expected-to-crest/>