

Estudo experimental de escoamentos em regime uniforme e não uniforme em canais de secção composta

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em **Engenharia Civil**

Autor

Eduardo José Alves Teixeira

Orientadores

Prof. João Bento Leal

Eng. João Rocha (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

Colaboração Institucional



Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Departamento de Hidráulica

Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Fluviais

Lisboa, Fevereiro de 2011

Agradecimentos

Com o trabalho apresentado nesta dissertação, devo apresentar uma simples forma de agradecimento a todos os seus intervenientes sem os quais teria sido impossível a sua realização.

Ao Professor João Leal agradeço a total disponibilidade e empenho que demonstrou no decorrer da dissertação. Não apenas pelo seu conhecimento científico, mas também pela amizade e apoio ao longo deste tempo.

Realizar todos os trabalhos experimentais no Departamento de Hidráulica do Pavilhão de Hidráulica Fluvial, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), foi possível graças à aprovação do Eng. João Rocha, a quem agradeço a colaboração.

Lembro ainda que este trabalho é a continuação do trabalho realizado pelos meus colegas e amigos David Pinto e Eng. João Fernandes a quem agradeço os documentos fornecidos que ajudam a complementar o trabalho e a disponibilidade demonstrada ao longo da campanha experimental.

Também é necessário reconhecer a ajuda dos elementos que deram apoio constante no Pavilhão, onde foram realizados todos os ensaios, nomeadamente, na construção do canal, fornecimento e arranjo de materiais, equipamentos, etc.

Apesar de não estarem ligados de uma forma directa na realização desta dissertação, o meu agradecimento final é para a minha família e amigos, por todo o carinho, apoio e compreensão que demonstram desde sempre.

Resumo

Apesar de os escoamentos dos rios se realizarem usualmente no leito principal, em situações de cheia a capacidade de vazão deste é excedida e o escoamento faz-se também nos campos adjacentes, denominados por leitos de cheia, obtendo uma configuração de secção composta. Como na zona do leito principal a profundidade é maior do que a do leito de cheia, existe uma diferença de velocidades entre eles que dá origem a interações e a transferências de massa e de quantidade de movimento. Nestas condições as características do escoamento não se encontram bem definidas devido ao grande número de variáveis.

Esta dissertação pretende, através de caracterização experimental, estudar os mecanismos envolvidos no escoamento neste tipo de canais bem como na interação entre o leito principal e o leito de cheias.

A componente experimental incluiu a recolha e tratamento de dados relativos à estrutura turbulenta do escoamento e suas alterações para as situações de regime uniforme e várias destabilizações em regime não uniforme. Verificou-se que as condições de regime não uniforme podem afectar a camada de mistura que se desenvolve na interface entre o leito principal e cada leito de cheia. Esses efeitos podem ser observados nas tensões turbulentas e na tensão aparente, e devem-se à transferência de massa entre os leitos e a alteração do gradiente lateral da velocidade longitudinal.

Palavras chave: canais de secção composta; escoamento uniforme e não uniforme; camada de mistura.

Abstract

Even though most of the river flow takes place in the main channel, in flood cases, the flow capacity of the main river bed is exceeded and there is a transfer of flow from the main channel to the adjacent fields, called overbank. Thus, the typical configuration of the rivers in flood situations is a compound bed-section. The flow in the main channel interacts with the overbank flow, typically with less depth and therefore slower. When these phenomena occur, the flow characteristics are not sufficiently defined mainly due to that interaction between the flows.

This work intends to use the experimental characterization to study the mechanisms involved in compound channels and the interaction between the flows in the main channel and in the floodplains.

The experimental work included the collection and processing of data concerning the structure of turbulent flow and its changes to the situation of uniform and non-uniform flow. It was found that non-uniform flow conditions can affect the mixing layer that develops at main channel and each floodplain interface. The effects can be felt in the turbulent stresses and in the apparent shear stress, mainly due to mass transfer between subsections and to change in the lateral gradient of the streamwise velocity.

Key words: compound open-channel; uniform and non-uniform flow; mixing layer.

SIMBOLOGIA

Símbolo	Significado
A	constante aditiva da lei logaritmica
b	largura do leito principal
B	largura da secção total do canal
C	coeficiente de Chezy
f	coeficiente de Weisbach
g	aceleração gravítica
h	altura de água nos leitos de cheia
H	energia total, altura de água, altura de água no leito principal
h_r	altura relativa
J	perda de carga unitária
k_s	rugosidade absoluta, altura das rugosidades da fronteira fixa
K_s	coeficiente de rugosidade de Strickler
l	comprimento característico
n	coeficiente de Manning
p	pressão
P	perímetro molhado
Q	caudal escoado
Q_0	caudal de cálculo
R	raio hidráulico
Re	número de Reynolds
S	secção de escoamento
S_0	declive do canal
S_f	inclinação da linha de energia
t	tempo
u, U	componente da velocidade de escoamento no sentido do escoamento
\bar{u}	velocidade média de escoamento
u'	componente de flutuação da velocidade de escoamento
u_*	velocidade de atrito junto ao fundo
U^+	componente da velocidade no sentido do escoamento adimensionalizada
v	componente da velocidade de escoamento na direcção transversal ao escoamento
V	Diferencial de pressão
V_t	Vector total
X	posição longitudinal no canal
Y	posição transversal no canal
z	cota geométrica

z^+	cota geométrica adimensionalizada
α	coeficiente de Coriolis
γ	peso volúmico
δ	comprimento da camada de mistura
δ'	espessura da subcamada viscosa
θ	ângulo
ν	coeficiente de viscosidade cinemática
ρ	massa volúmica
κ	constante universal de Von Kármán
μ	viscosidade dinâmica
τ	tensão tangencial
T_0	tensão de arrastamento
T_l	tensão tangencial devida à viscosidade cinemática
T_t	tensão tangencial aparente devida às flutuações turbulentas da velocidade
T_{xy}	tensão de Reynolds

ÍNDICES:

Índice	Significado
med	valor médio
M	montante
LC	leito de cheia
LP	leito principal
Tot	secção total
X	valor na posição X

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Estrutura da dissertação	3
2. Estado do conhecimento	5
2.1. Conceitos teóricos	5
2.1.1. Estrutura turbulenta	5
2.1.2. Desenvolvimento da camada limite	7
2.1.3. Perfil vertical de velocidades	8
2.1.4. Distribuição das velocidades médias	10
2.1.5. Distribuição das tensões tangenciais	11
2.2. Estudos experimentais em canais de secção composta	14
2.2.1. Regime uniforme	14
2.2.2. Regime não uniforme	17
3. Descrição da campanha experimental.....	19
3.1. Instalação experimental	19
3.2. Equipamentos de medição e controlo	22
3.2.1. Medidores electromagnéticos de caudal (Caudalímetros)	22
3.2.2. Tubo de Pitot	23
3.2.3. Tubo de Preston	26
3.2.4. Sondas Ultra Sónicas	27
3.3. Ensaio realizados	32
3.4. Procedimento experimental	35
3.4.1. Malha de medição e procedimento de integração das velocidades	35
4. Resultados obtidos.....	37
4.1. Regime Uniforme	37
4.1.1. Desenvolvimento do escoamento ao longo do canal	37
4.1.2. Distribuição transversal da velocidade média em profundidade e dos caudais por leito. Influência da altura relativa.	42
4.1.3. Distribuição transversal das tensões de arrastamento.	47

4.1.4.	Distribuição das tensões de Reynolds	52
4.2.	Regime não uniforme	53
4.2.1.	Desenvolvimento do escoamento ao longo do canal (+19%)	53
4.2.2.	Distribuição transversal das tensões de arrastamento	57
4.2.3.	Outras destabilizações	60
4.2.4.	Distribuição das tensões de Reynolds	66
4.2.4.1.	Várias destabilizações.....	66
4.2.4.2.	Evolução longitudinal +19%	68
4.2.4.3.	Evolução longitudinal -19%.....	69
5.	Conclusões e propostas para futuros estudos.....	71
6.	Bibliografia	73

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Caudais das várias destabilizações	34
Quadro 2 – Secções analisadas para cada destabilização	34
Quadro 3 – Valores dos caudais obtidos experimentalmente para $h_r = 0,3$ em regime uniforme	38
Quadro 4 – Dimensões da camada de mistura para diferentes alturas relativas (Dados de $h_r = 0,1$ e $h_r = 0,2$ retirados e revistos de Pinto, 2010)	43
Quadro 5 – Largura da camada de mistura nas várias secções (+19%).....	54
Quadro 6 – Valores da inclinação média da linha de energia	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de escoamento em secção composta	1
Figura 2 – Exemplo de cheia (Rio Appetsu, Hokkaido, Japão, Agosto de 2003)	1
Figura 3 – Estrutura turbulenta de um escoamento em secção composta (Adaptada de Shiono e Knight, 1991)	5
Figura 4 – Esquema dos vórtices de eixo vertical verificados nas interfaces (adaptada de Prooijen <i>et al.</i> , 2005)	6
Figura 5 – Escoamento paralelo a um plano liso (adaptado de Vennard e Street, 1978)	7
Figura 6 – Esquema do perfil vertical de velocidades num canal (adaptada de Nezu, 2005)	8
Figura 7 – Desenvolvimento da camada de mistura (Pinto, 2010)	10
Figura 8 – Esquema utilizado para a determinação da largura da camada de mistura (Prooijen <i>et al.</i> 2005).	10
Figura 9 – Esquema de forças aplicadas num elemento de fluido (adaptada de Cardoso, 1998)	11
Figura 10 – Variação das tensões de corte com a profundidade do escoamento (adaptada de Cardoso, 1998)	13
Figura 11 – Altura cinética e perfil de velocidades num canal sem separação da alimentação de caudais iniciais, visto no início do canal e a numa secção a jusante. a) vista lateral; b) vista em planta (Adaptado de Bousmar <i>et al.</i> 2005)	17
Figura 12 – Esquema do circuito fechado da instalação experimental	19
Figura 13 – Perfil transversal do canal de secção composta.	19
Figura 14 – Elementos utilizados a montante para reduzir a transferência de massa entre subsecções	20
Figura 15 – Reservatório com hidrómetro com ligação ao fundo do canal	21
Figura 16 – Caudalímetros situados no início do canal	22
Figura 17 – Tubo de Pitot	23
Figura 18 – Representação esquemática do funcionamento do tubo de Pitot (adaptada de Quintela, 1981).	23
Figura 19 – Transdutor diferencial de pressão	24
Figura 20 – Exemplo de curva de calibração do captor diferencial de pressões	25
Figura 21 – Sonda ultra-sónica UVP	27
Figura 22 – Representação esquemática do feixe de leitura emitido pelas sondas UVP (adaptada de Fernandes <i>et al.</i> , 2010)	28
Figura 23 – Flow mapping; decomposição ortogonal do vector (adaptado de Met-Flow, 2002)	29
Figura 24 – Apoio fixo para os transdutores	29
Figura 25 – Medição de um perfil de velocidades utilizando Flow-mapping. Em cima os dados fornecidos pelo software, em baixo os mesmos dados após o método de despigagem proposto por Goring e Nikora (2002)	30

Figura 26 – Introdução de <i>seeding</i> no escoamento. Lado esquerdo, preparação da concentração de casca de avelã; lado direito, reservatório a montante do canal.	31
Figura 27 – Esquematisação das secções estudadas ao longo do canal	32
Figura 28 – Procedimento para a obtenção do regime uniforme	33
Figura 29 – Malha de leituras ao longo de uma dada secção	35
Figura 30 – Comparação entre o perfil de velocidades médias e o perfil registado a 40% da altura do escoamento	36
Figura 31 – Esquematisação da integração realizada para cálculo do caudal escoado numa determinada secção (retirado de Pinto, 2010)	36
Figura 32 – Perfis de velocidade no centro da secção ao longo do canal	37
Figura 33 – Perfis das velocidades em secção transversal, obtidos experimentalmente para várias secções (RU)	38
Figura 34 – Velocidade longitudinal registada com sondas UVP, a uma altura de 40% e 60% do nível da água do leito de cheia (X5000)	39
Figura 35 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X3000 (RU $h_r = 0,3$)	40
Figura 36 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X5000 (RU $h_r = 0,3$)	40
Figura 37 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X7500 (RU $h_r = 0,3$)	40
Figura 38 – Perfis de tensões de arrastamento em diversas secções transversais (RU)	41
Figura 39 – Comparação dos perfis de velocidade em secção transversal (X7500)	42
Figura 40 – Rácio das velocidades médias do leito principal e do leito de cheia pela velocidade média da secção total	43
Figura 41 – Rácio da velocidade média no leito principal pela velocidade média no leito de cheia	44
Figura 42 – Rácio do caudal do leito principal e do leito de cheia pelo caudal total	45
Figura 43 – Rácio do caudal do leito principal pelo leito de cheia	46
Figura 44 – Comparação dos perfis de tensões de arrastamento em secção transversal (X7500)	47
Figura 45 – Comparação dos valores obtidos experimentalmente para tensões totais de atrito em relação aos valores teóricos	48
Figura 46 – Percentagem das forças de atrito actuantes nos leitos de cheia	50
Figura 47 – Variação das forças de atrito aparente verticais	51
Figura 48 – Tensões de Reynolds (X5000)	52
Figura 49 – Variação longitudinal dos caudais do leito principal	53
Figura 50 - Variação longitudinal dos caudais dos leitos de cheia	53
Figura 51 – Perfis de velocidades em secção transversal (+19%)	54
Figura 52 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X3000 (+19% $h_r = 0,3$)	55
Figura 53 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X5000 (+19% $h_r = 0,3$)	55
Figura 54 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X6000 (+19% $h_r = 0,3$)	55
Figura 55 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X7500 (+19% $h_r = 0,3$)	55
Figura 56 – Perfis das tensões de arrastamento em secção transversal (+19%)	56

Figura 57 – Comparação dos perfis das tensões de arrastamento em secção transversal (X7500)	57
Figura 58 – Comparação dos valores obtidos experimentalmente para tensões totais de atrito com valores teóricos	58
Figura 59 – Percentagem das forças de atrito actuantes nos leitos de cheia	59
Figura 60 – Variação das forças de atrito aparente verticais	59
Figura 61 – Perfis de velocidades para várias destabilizações em secção transversal (X5000)	60
Figura 62 – Perfis de velocidades para várias destabilizações em secção transversal obtidas a 40% da altura de água do LC (X5000)	61
Figura 63 – Perfis de velocidades para várias destabilizações em secção transversal obtidas a 60% da altura de água do LC (X5000)	61
Figura 64 – Distribuição de velocidades médias no tempo (-19% $h_r = 0,3$)	62
Figura 65 – Distribuição de velocidades médias no tempo (RU $h_r = 0,3$)	62
Figura 66 – Distribuição de velocidades médias no tempo (+19% $h_r = 0,3$)	62
Figura 67 – Distribuição de velocidades médias no tempo (+38% $h_r = 0,3$)	62
Figura 68 – Distribuição de velocidades médias no tempo (+53% $h_r = 0,3$)	62
Figura 69 – Rácio das velocidades médias de LP e LC pela velocidade média da secção total	63
Figura 70 – Rácio da velocidade média no leito principal pela velocidade média do leito de cheia	64
Figura 71 – Rácio dos caudais nos leitos de cheia e principal pelo caudal total	64
Figura 72 – Rácio do caudal do leito principal pelo caudal do leito de cheia	65
Figura 73 – Tensões de Reynolds a 40% para várias destabilizações (X5000)	66
Figura 74 – Tensões de Reynolds a 60% para várias destabilizações (X5000)	66
Figura 75 – Evolução Longitudinal das tensões de Reynolds registadas a 40% (+19%)	68
Figura 76 – Evolução Longitudinal das tensões de Reynolds registadas a 60% (+19%)	68
Figura 77 – Evolução Longitudinal das tensões de Reynolds registadas a 40% (-19%)	69
Figura 78 – Evolução Longitudinal das tensões de Reynolds registadas a 60% (+19%)	69

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

Os rios são um importante recurso ambiental e usualmente um factor importante na fixação de populações. No entanto os escoamentos fluviais são frequentemente afectados tanto por factores humanos como por fenómenos naturais. É necessário existir uma harmonia entre a intervenção humana e a natureza para garantir uma boa utilização deste valioso recurso.

Na maioria dos casos os rios apresentam uma secção transversal composta por um leito principal (LP), ladeado por um ou dois leitos de cheia (LC). Em situações de cheia, o leito principal não é suficiente para escoar todo o caudal afluyente e a subida do nível da água provoca a inundação dos leitos de cheia (Fig. 1), alterando as características do escoamento.

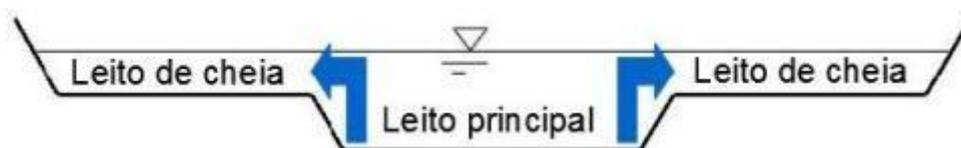


Figura 1 – Exemplo de escoamento em secção composta

Nestas condições (Fig. 2) torna-se difícil averiguar a capacidade de descarga, pois verifica-se a interacção entre o escoamento mais rápido no leito principal e um escoamento mais lento no(s) leito(s) de cheias dando origem a transferências de massa e de quantidade de movimento, que desaceleram o escoamento e diminuem a capacidade de descarga no leito principal.



Figura 2 – Exemplo de cheia (Rio Appetsu, Hokkaido, Japão, Agosto de 2003)

Os métodos convencionais utilizados para calcular a capacidade de vazão de um rio definem estes escoamentos de uma forma simplificada como sendo unidimensionais, contudo, devido à grande interacção entre leitos estes escoamentos podem apresentar grande variabilidade tridimensional e afastar os valores obtidos por estes métodos das reais capacidades de vazão.

Os ensaios realizados recolheram dados sobre velocidades instantâneas longitudinais e transversais, alturas de escoamento, tensões de arrastamento junto ao fundo e tensões tangenciais nas interfaces entre leito principal e leito de cheia. Foi estudado um escoamento uniforme e várias destabilizações a nível da alimentação de ambos os leitos para analisar os fenómenos que se instalavam com as alterações. A interacção entre o leito principal e os leitos de cheia foi caracterizada, avaliando-se a importância relativa dos efeitos da turbulência, das transferências de massa e de quantidade de movimento entre as subsecções.

Este trabalho tem como objectivo principal caracterizar o escoamento quando este se processa, simultaneamente, no leito principal e nos leitos de cheia. Para isso foram estabelecidos os seguintes objectivos específicos:

- Verificação do comportamento do escoamento em situação de regime uniforme, para uma dada altura de água escoada (situação padrão).
- Caracterização do escoamento com várias destabilizações (em condições de regime não uniforme), para averiguar a importância das transferências de massa entre os leitos principal e de cheias.

O trabalho desenvolvido na presente dissertação enquadra-se no programa de trabalhos dos seguintes projectos de investigação financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia:

- “Escoamentos pouco profundos: influência das transferências de massa devidas à difusão turbulenta” Cooperação Portugal/França Programa Pessoa 2009-2010 Proc. 441.00 França.
- “Medição e Modelação da Turbulência em Escoamentos em Canais com Secção Composta” PTDC/ECM/70652/2006.
- “Modelação experimental e matemática do escoamento em canais de secção composta” Bolsa de Doutoramento SFRH/BC/37839/2007.

Refira-se que no âmbito do primeiro projecto, os resultados obtidos na presente dissertação permitiram a apresentação da comunicação intitulada “Experimental study of uniform and nonuniform compound channel flows” de J. Fernandes, E. Teixeira, J. Leal e A.H. Cardoso, efectuada no Instituto de Investigação Cemagref em Lyon, França, em Dezembro de 2010.

1.2. Estrutura da dissertação

No presente capítulo efectua-se um enquadramento deste estudo com as situações reais, com a descrição dos principais objectivos da dissertação.

Após esta apresentação, no segundo capítulo apresentam-se os conceitos teóricos necessários para interpretar e analisar os dados obtidos, bem como trabalhos de diversos autores e os seus resultados.

No capítulo 3, procede-se à descrição das instalações e equipamentos de medição utilizados no decorrer dos ensaios experimentais, bem como a caracterização do procedimento experimental e tratamento de dados desenvolvido em cada etapa.

No capítulo 4 apresentam-se, analisam-se e discutem-se os dados obtidos experimentalmente no âmbito da dissertação, tendo-se realizado comparações com estudos já existentes.

Finalmente, no capítulo 5 listam-se as principais conclusões retiradas no decorrer de todo o trabalho e apontam-se as diversas possibilidades de desenvolvimento da investigação efectuada.

2. Estado do conhecimento

2.1. Conceitos teóricos

2.1.1. Estrutura turbulenta

Existe uma dificuldade em caracterizar um escoamento em canais de secção composta devido à grande interacção entre o leito principal e o lento leito de cheia que não pode ser ignorado (Nezu, 1994). Essa interacção transporta quantidade de movimento do leito principal para as zonas dos leitos de cheia, promovendo uma perda de energia e uma substancial diminuição na capacidade de descarga do canal de secção composta, apontado por diversos autores como Shiono e Knight (1991) que representaram a estrutura turbulenta desenvolvida na interface entre os dois leitos conforme se apresenta na Fig. 3.

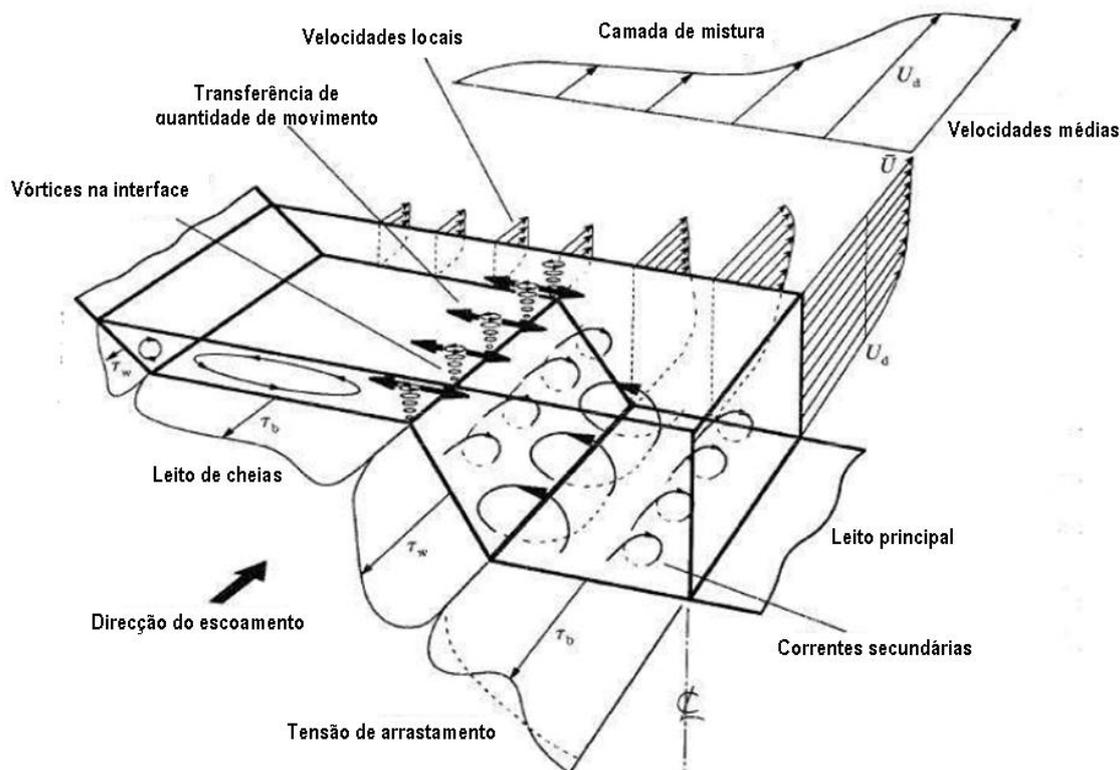


Figura 3 – Estrutura turbulenta de um escoamento em secção composta (Adaptada de Shiono e Knight, 1991)

Através desta figura é possível observar a existência de vórtices de eixo vertical e horizontal, os primeiros desenvolvem-se através da diferença de velocidades entre leitos provocando uma transferência de quantidade de movimento afectando as distribuições de velocidades (ver Fig. 4), enquanto os de eixo horizontal que se desenvolvem longitudinalmente resultam da anisotropia da turbulência entre os leitos e de forças centrífugas geradas no escoamento.

Estes dois tipos de vórtices estão interligados mutuamente e tridimensionalmente e podem surgir intermitentemente no espaço e no tempo o que complica bastante a caracterização destas estruturas (Nezu, 1994).

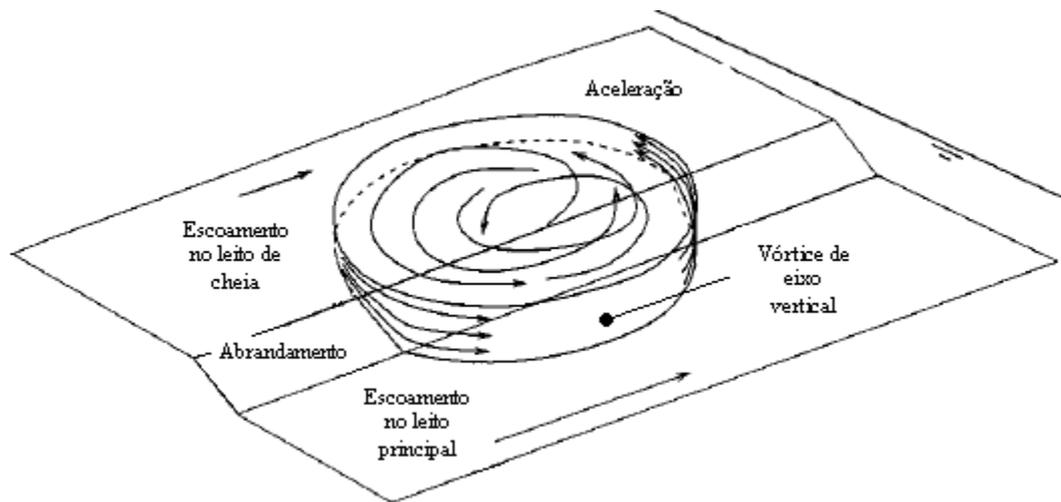


Figura 4 – Esquema dos vórtices de eixo vertical verificados nas interfaces (adaptada de Prooijen *et al.*, 2005)

2.1.2. Desenvolvimento da camada limite

Em escoamentos líquidos, a velocidade do fluido desenvolve-se de uma forma contínua e é nula sobre as superfícies sólidas (paredes laterais ou fundo do canal) independentemente destas serem lisas ou rugosas. Para regimes turbulentos existe uma subcamada viscosa entre o escoamento e a superfície do sólido devido à diminuição do processo de mistura, que ao reduzir o comprimento de mistura disponível (igual a zero quando próximo da superfície sólida), forma uma película de escoamento viscoso sobre o contorno. Para um fluido real registam-se valores de velocidade nula sobre a superfície do sólido, grande tensão de atrito e gradiente de velocidade.

A zona onde o perfil de velocidade é governado pela acção dos fenómenos associados à viscosidade denomina-se por camada limite. A forma mais comum de representação desta zona é representada na Fig. 5, correspondente ao escoamento paralelo a uma placa lisa. Ao longo do escoamento sobre um corpo, as partículas do fluido que passam na superfície deste permanecem em repouso, registando-se em contrapartida gradientes de velocidade elevados em redor. A tais gradientes de velocidade correspondem tensões de corte elevadas que originam o retardamento dos elementos de fluido que se deslocam a jusante do escoamento. Assim, verifica-se um alargamento contínuo da camada limite ao longo do corpo.

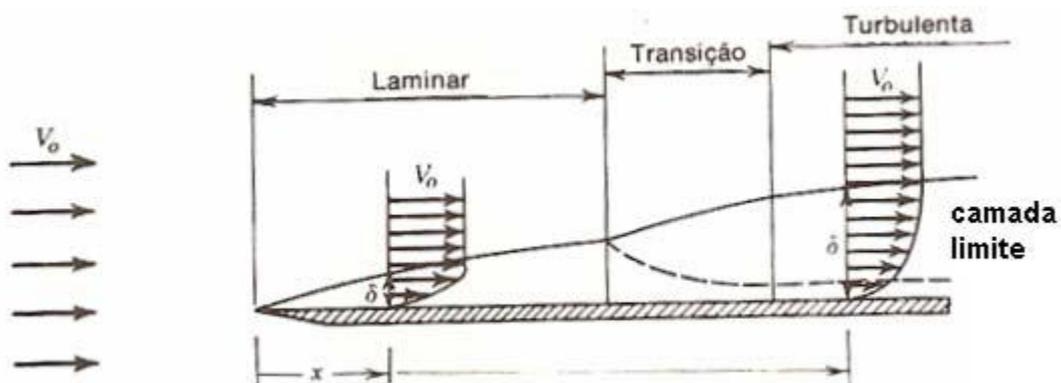


Figura 5 – Escoamento paralelo a um plano liso (adaptado de Vennard e Street, 1978)

2.1.3. Perfil vertical de velocidades

O perfil vertical de velocidades $u(z)$ de escoamentos turbulentos com superfície livre, apresenta uma forma logarítmica aproximada onde é possível identificar duas regiões com características distintas. De acordo com a Fig. 6, é possível identificar uma região próxima da superfície sólida ($z/H \approx 0,2$) denominada região interior ou da parede, na qual a estrutura do escoamento está a ser influenciada pela proximidade ao fundo do canal (onde a velocidade do escoamento é nula) e como tal está a ser directamente influenciada pela tensão de arrastamento τ_0 e no caso de fronteiras rugosas, com o valor da respectiva rugosidade k_s . Por outro lado a região próxima da superfície livre ($z/H \approx 0,2$), em que apenas indirectamente se faz sentir o efeito da influência da tensão de arrastamento, τ_0 . O ligeiro declive do canal é representado pelo parâmetro S_0 e a altura de água por H .

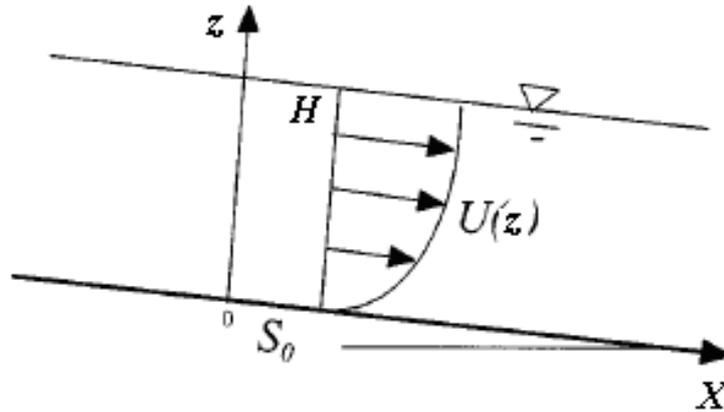


Figura 6 – Esquema do perfil vertical de velocidades num canal (adaptada de Nezu, 2005)

A região próxima do fundo canal subdivide-se em 3 sub-regiões: a subcamada viscosa, a subcamada de transição e a subcamada turbulenta, mas no âmbito deste trabalho apenas se tem em consideração a existência da subcamada viscosa (δ'), na região interior, cuja espessura é dada pela seguinte expressão (e.g. Nezu e Nakagawa, 1993):

$$\delta' = \frac{11,6\nu}{u_*} \quad (1)$$

em que u_* expressa a velocidade de atrito junto o fundo do canal (m/s), que pode ser calculada de diversas formas:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2)$$

$$u_* = \sqrt{g \cdot R \cdot S_0} \quad (3)$$

onde τ_0 é a tensão de arrastamento (Pa ou N/m²); ρ representa a massa volúmica da água (1000 kg/m³) e S_0 o declive do canal (m/m).

Ou então através da lei logarítmica válida na região interior para escoamentos turbulentos,

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + A \quad (4)$$

em que $U^+ = u/u_*$; $z^+ = z \cdot u_*/\nu$; κ é a constante universal de von Kármán, igual a 0,41 e A é uma constante aditiva universal que toma o valor de 5,3 para escoamentos em superfície livre (e.g. Nezu e Nakagawa, 1993). A expressão (4) é em rigor aplicável à camada logarítmica que se situa na região interior entre $z^+ > 26$ e $z/H < \approx 0,2$. Para averiguar se a fronteira é hidraulicamente lisa, recorre-se à seguinte condição (e.g. Nezu e Nakagawa, 1993):

$$k_s^+ = \frac{k_s \cdot u_*}{\nu} < \approx 5 \quad (5)$$

em que k_s é a rugosidade absoluta (i.e. a altura das rugosidades da fronteira fixa). Desenvolvendo a expressão das velocidades, válida para a região interior (4), de acordo com as propriedades do logaritmo, pode-se obter:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z) + \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{u_*}{\nu}\right) + u_* A \quad (6)$$

Considerando uma regressão linear, cuja expressão geral é do tipo $u = a \ln(z) + b$, obtém-se:

$$a = \frac{u_*}{\kappa} \quad (7)$$

$$b = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{u_*}{\nu}\right) + u_* A \quad (8)$$

2.1.4. Distribuição das velocidades médias

As velocidades de escoamentos em canais de secção composta de leito liso variam dos leitos de cheia para o leito principal. Na Fig. 7 representa-se um possível perfil de velocidade média nessas condições, onde na posição A corresponde à introdução separativa e diferencial do caudal (Bousmar *et al.*, 2005) enquanto na posição B representa uma secção mais a jusante onde é possível verificar o efeito das paredes laterais com a respectiva redução da velocidade e a zona de transição das velocidades médias mais lentas do leito de cheia para a zona mais rápida no leito principal. O percurso entre as duas posições faz parte do desenvolvimento da camada de mistura (e.g. Prooijen e Uijtewaal, 2002).

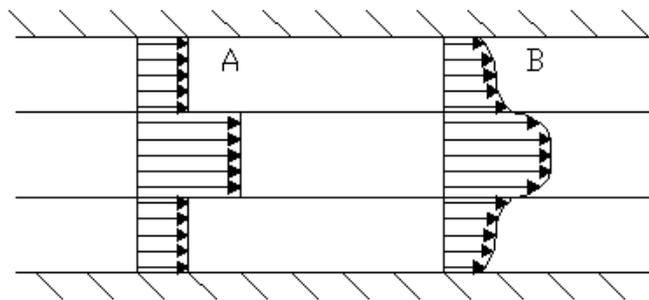


Figura 7 – Desenvolvimento da camada de mistura (Pinto, 2010)

Um dos critérios para a determinação da largura de mistura (δ) foi sugerido em Prooijen *et al.* (2005) e é dado, de acordo com o indicado na Fig. 8, pelo dobro da distância entre $y_{25\%}$, onde $u(y_{25\%}) = u_{LC} + 0,25 (u_{LP} - u_{LC})$ e $y_{75\%}$, onde $u(y_{75\%}) = u_{LC} + 0,75 (u_{LP} - u_{LC})$.

$$\delta = 2(y_{75\%} - y_{25\%})$$

(9)

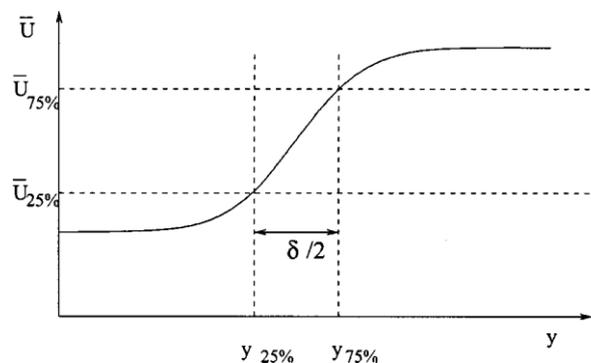


Figura 8 – Esquema utilizado para a determinação da largura da camada de mistura (Prooijen *et al.* 2005).

2.1.5. Distribuição das tensões tangenciais

De acordo com a Fig. 9, num determinado volume ABCD de espessura unitária, são várias as forças que actuam segundo a direcção vertical que contribuem para o equilíbrio do elemento de fluído. Nas faces horizontais AB e CD actuam forças resultantes das pressões hidrostáticas, que se anulam pois têm valores iguais e sentidos opostos e existem também quantidades de movimento que por sua vez apresentam uma variação nula. Na face horizontal inferior actua a resultante das tensões tangenciais e a componente W_x do peso do volume considerado, na direcção do escoamento (Cardoso, 1998).

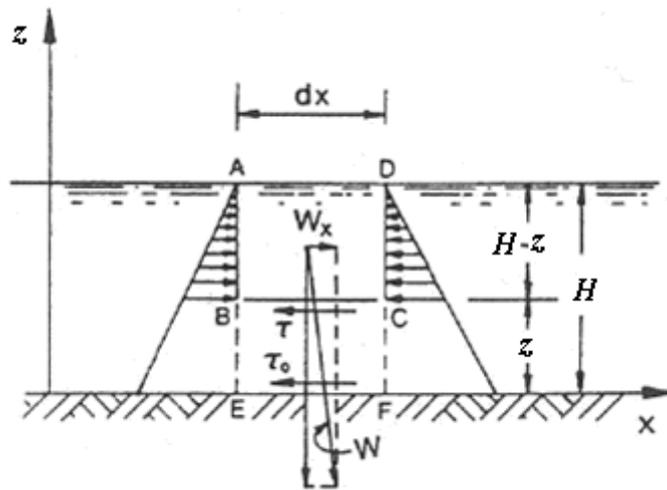


Figura 9 – Esquema de forças aplicadas num elemento de fluido (adaptada de Cardoso, 1998)

O valor da tensão tangencial na direcção do escoamento (τ), à distância z do fundo pode se obtido através do equilíbrio destas forças da seguinte forma:

$$WJ - \tau dx = 0 \quad (10)$$

$$\tau = \gamma(H - z)J = \gamma hJ \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (11)$$

onde J representa a perda de carga unitária, que em canais pouco inclinados é aproximadamente igual ao declive da linha de energia ($W_x = W \sin \theta = WJ$); θ é o ângulo que o plano de fundo faz com o plano horizontal; dX é uma distância genérica (m); γ é o peso volumico da água (9800 N/m^3) e τ é uma tensão tangencial na direcção do escoamento (Pa).

Verifica-se através desta igualdade que a tensão tangencial aumenta linearmente com a distância à superfície, anulando-se à superfície e atingindo o valor máximo junto ao fundo do canal.

A tensão tangencial no fundo (τ_0), é normalmente designada por tensão de arrastamento, e apresenta a seguinte forma,

$$\tau_0 = \gamma H J \quad (12)$$

em que H pode ser substituído pelo raio hidráulico R (m) e J é substituído pelo declive do canal S_0 (m/m).

Nos escoamentos turbulentos uniformes e bidimensionais, a tensão tangencial, τ , num ponto à distância z do fundo, resulta da soma de duas componentes:

$$\tau = \tau_l + \tau_t \quad (13)$$

sendo, τ_l a tensão tangencial devida à viscosidade dinâmica, μ , e é dada pela seguinte expressão

$$\tau_l = \mu \frac{du}{dz} \quad (14)$$

em que du/dz é o gradiente de velocidade à distância z do fundo. Já a componente τ_t é a tensão tangencial devida às flutuações turbulentas da velocidade, também designada por tensão de Reynolds, e resulta de

$$\tau_t = -\rho \overline{u'v'} \quad (15)$$

em que $\overline{u'v'}$ é a média temporal do produto entre u' correspondente ao valor da oscilação em relação ao valor médio da velocidade no sentido do escoamento e v' no sentido transversal.

Em termos de velocidade média pontual, a componente τ_t pode ser aproximada por (cf. Nezu, 2005)

$$\tau_t = \rho l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (16)$$

sendo l o comprimento de mistura definido por Prandtl.

Apesar de não se conhecer a lei de variação deste comprimento em função da distância ao fundo z , está porém definido, que na proximidade das fronteiras sólidas, é válida a expressão (e.g. Nezu e Nakagawa, 1993)

$$l = \kappa \cdot z \quad (17)$$

em que κ representa a constante de von Kármán.

No caso de escoamentos turbulentos bidimensionais em canais de superfície livre, as variações de τ_l e τ_t com a distância ao fundo z , podem ser esquematizadas da forma como se apresenta na Fig. 10,

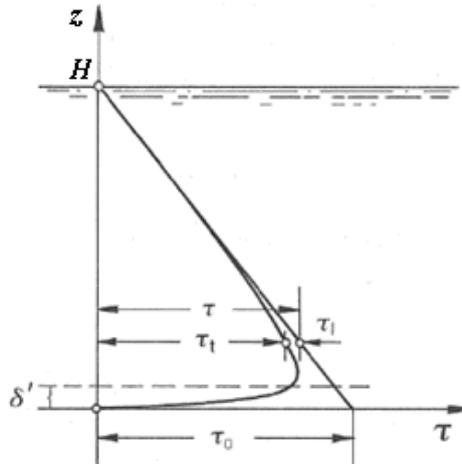


Figura 10 – Variação das tensões de corte com a profundidade do escoamento (adaptada de Cardoso, 1998)

na qual é possível observar que:

- Para valores de z acima de δ' (espessura da subcamada viscosa), a tensão tangencial total (τ), é praticamente igual à tensão tangencial de origem turbulenta (τ_t), sendo desprezável a restante componente;
- Para valores de z inferiores a δ' , na subcamada viscosa, a tensão tangencial total é praticamente igual a τ_l , sendo praticamente desprezável a restante componente.

Assim sendo, o escoamento na região $\delta' < z < H$ pode ser considerado praticamente independente da viscosidade, ao contrário da região $k_s < z < \delta'$ onde prevalece o efeito da viscosidade sendo válida a expressão de τ_l (14). A expressão (13), pode assim dividir-se em

$$\tau = \tau_l = \mu \frac{du}{dz}, \text{ com } \tau_l \text{ para } z < \delta' \quad (18)$$

que é a expressão analítica de um escoamento laminar, ou então,

$$\tau = \tau_t = \rho l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2, \text{ com } \tau_t \text{ para } z > \delta' \quad (19)$$

que traduz a expressão para escoamentos turbulentos totalmente desenvolvidos (e.g. Cardoso, 1998).

2.2. Estudos experimentais em canais de secção composta

2.2.1. Regime uniforme

O escoamento permanente uniforme é o tipo de escoamento que permite a realização de um estudo mais simples, embora na prática ele não seja observado com a frequência que se poderia pensar. Para a situação de regime uniforme, a altura, a velocidade e o caudal mantêm-se aproximadamente constantes longitudinalmente, na direcção X (e.g. Chow, 1959).

$$\frac{\partial H}{\partial X} = 0; \frac{\partial u}{\partial X} = 0; \frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \quad (20)$$

Por esta razão, o nível da superfície da água z_w é aproximadamente o mesmo ao longo das subsecções do canal. No caso de ser regime de escoamento lento a altura de água é definida pelas condições de jusante, e as interacções entre os leitos devem estar desenvolvidas para prevenir transferências consideráveis de massa entre ambos.

Existe uma quantidade considerável de trabalhos relativos à interacção entre os escoamentos no leito principal (LP) e no leito de cheias (LC) para regime uniforme (cf. Proust, 2005). A dificuldade de entender e modelar estes fenómenos que ocorrem na interface entre os leitos advém do facto dos processos físicos (ver secção 2.1.1) serem função de vários parâmetros geométricos e hidráulicos: a altura do leito principal, h ; a relação entre as alturas do escoamento no leito de cheias e no leito principal, designada altura relativa, $hr = h_{LC}/h_{LP}$; a relação entre as larguras do LC e do LP, B_{LC}/B_{LP} ; a relação entre as rugosidades (traduzidas usualmente pelo coeficiente de Manning, n) dos dois leitos, designada rugosidade relativa, n_{LC}/n_{LP} ; inclinação do fundo, S_0 ; e a forma da secção transversal do canal (rectangular, trapezoidal, entre outras).

A região de transferência de quantidade de movimento ou camada de mistura é uma área de produção de estruturas turbulentas, alguns dos vórtices de eixo vertical (ver Fig. 3). Esta região de transferência foi, até final dos anos 70, objecto de muitos modelos físicos em canais laboratoriais de pequena dimensão. Posteriormente, a necessidade de eliminar todos os efeitos de escala e de aproximar os escoamentos experimentais aos que ocorrem em rios, caracterizados por elevados números de Reynolds motivou a construção de dois grandes modelos físicos.

O primeiro estudo num modelo de grande escala foi realizado no Laboratoire d'Hydraulique Nacional da EDF em Chatou, França, num canal de 60m x 3m durante um período de três anos. Os principais resultados são resumidos em Nicollet e Uan (1979). O segundo estudo foi levado a cabo no *Flood Channel Facility* (FCF) do HR Wallingford, Reino Unido. Diversas

universidades britânicas contribuíram para a extensa análise do escoamento em secção composta em regime uniforme naquele canal (56m x 10m), entre 1987 e 1993. Os resultados encontram-se sintetizados em Knight (1992) e são, ainda hoje, utilizados por investigadores de todo o mundo para validar modelos que visam a simulação de escoamentos em canais com secção composta.

Myers (1978) sugeriu que transferência de quantidade de movimento na camada de mistura fosse vista como uma força ou tensão, conhecida como *apparent shear stress* (tensão de atrito aparente), que actua na fronteira virtual localizada na vertical da interface entre os leitos principal e de cheias. Esta tensão resulta do gradiente de velocidades na camada de mistura, que gera estruturas turbulentas que são responsáveis por uma perda adicional de energia, e representa a “intensidade” da turbulência.

Esta força é bem descrita e analisada em Knight e Demetriou (1983). Estes autores realizaram ensaios num canal com secção composta com 15 m de comprimento e 6,10 m de largura máxima, inclinação do fundo de 0,0966%, a rugosidade era igual no LP e LC. As paredes do LC eram removíveis de modo a variar a relação $(B_{LP} + B_{FP})/B_{LP}$. Mediram a distribuição de velocidade e tensão de arrastamento junto ao leito para diferentes razões $(B_{LP} + B_{FP})/B_{LP}$ e alturas relativas hr . A partir da média dos valores da tensão na parede em cada leito, τ_{LC} no LC, e τ_{LP} no LP, deduziram o valor da tensão aparente na interface, τ_a , através do balanço, válido para regime uniforme, entre a força de gravidade e as forças de atrito (tensão de arrastamento e tensão aparente) em cada um dos leitos. Aqueles autores expressaram as tensões em percentagem da tensão média $\rho g R_h S_0$, onde R_h é o raio hidráulico. Concluíram que a percentagem da tensão no fundo do leito de cheias aumenta para valores crescentes de $(B_{LP} + B_{FP})/B_{LP}$ e de hr , sendo esse aumento menos acentuado para $hr > 0,3$. Relativamente à percentagem da tensão aparente, esta aumenta muito rapidamente logo após o transbordo das planícies de inundação. Quando aumenta $(B_{LP} + B_{FP})/B_{LP}$, os valores da percentagem da tensão aparente crescem de forma consistente para $hr < 0,3$, e diminuem sistematicamente para $hr > 0,3$. A partir desses resultados experimentais, os autores calibraram uma fórmula empírica da tensão aparente em uma função de hr , de $(B_{LP} + B_{FP})/B_{LP}$ e da diferença nas velocidade médias em cada um dos leitos.

Outras fórmulas do mesmo tipo podem ser encontradas na literatura, incluindo P. R. Wormleaton *et al.* (1982), Prinós e Townsend (1984) e Wormleaton e Merrett (1990). Referindo-se cada uma a geometrias específicas, diferindo significativamente os seus factores de calibração, que são difíceis de usar fora do contexto onde foram estabelecidas. No entanto, elas são interessantes do ponto de vista qualitativo, pois mostram claramente que uma parcela significativa do fluxo de energia é dissipada na interface entre o LP e o LC e que esta perda é função de parâmetros geométricos $(B_{LP} + B_{FP})/B_{LP}$ e hidráulicos (h_r e diferença de velocidades médias entre os leitos). Moreta *et al.* (2010) aplicaram este tipo de formulação a um vasto conjunto de dados experimentais, calibrando o coeficiente da fórmula em função dos

parâmetros geométricos e hidráulicos. Para alcançar um bom ajustamento aos dados experimentais, aqueles autores propuseram duas fórmulas, uma válida para canais de pequena escala e outra válida para canais de grande escala.

2.2.2. Regime não uniforme

O estudo de escoamento em canais com secção composta em regime não uniforme é recente e foi despoletado pelos resultados obtidos por Proust (2005) e Bousmar *et al.* (2005). Estes autores constataram que na maioria dos estudos o leito principal e os leitos de cheia são alimentados pelo mesmo tanque através de uma zona de transição curva, o que significa que a altura de água inicial é igual para cada subsecção e conseqüentemente a altura cinética $U^2/2g$ e a velocidade U são também iguais (Fig. 11). Como resultado, o caudal dos leitos de cheia excede o caudal correspondente ao escoamento uniforme e desenvolve-se uma transferência de massa dos leitos de cheia para o leito de cheia até existir um equilíbrio do sistema. De acordo com Bousmar *et al.* (2005), para canais relativamente pequenos ($L/B_{FP} < 35$) estas transferências podem não estar concluídas nas secções mais a jusante, sugerindo a alimentação separativa das subsecções a montante com os caudais correspondentes ao escoamento em regime uniforme.

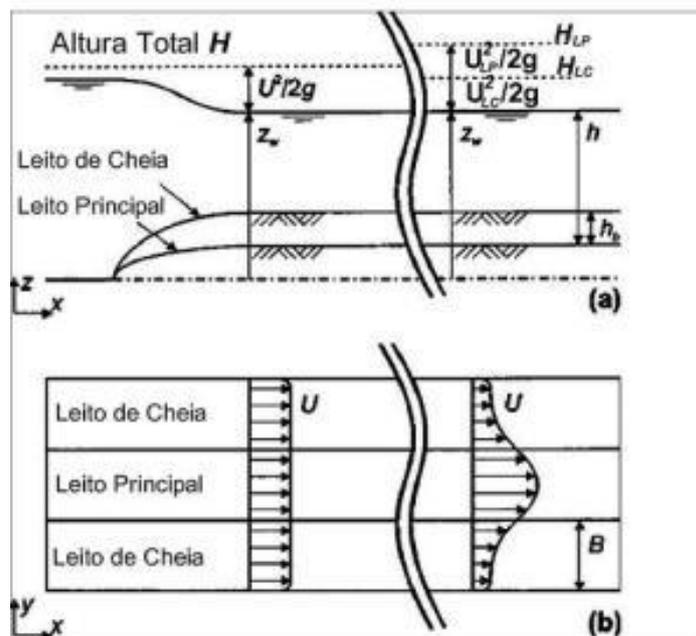


Figura 11 – Altura cinética e perfil de velocidades num canal sem separação da alimentação de caudais iniciais, visto no início do canal e a numa secção a jusante. a) vista lateral; b) vista em planta (Adaptado de Bousmar *et al.* 2005)

As conclusões de Proust (2005) e Bousmar *et al.* (2005) põem em causa grande parte dos estudos realizados no passado, dado que se reportam a escoamento uniforme mas na realidade tal não se verificava na instalação experimental. De facto, se o escoamento for não uniforme existe uma transferência de massa e de quantidade de movimento entre os leitos que expectavelmente afectará o desenvolvimento da camada de mistura e também o valor da tensão aparente. Note-se que neste caso a tensão aparente, de origem turbulenta, não poderá

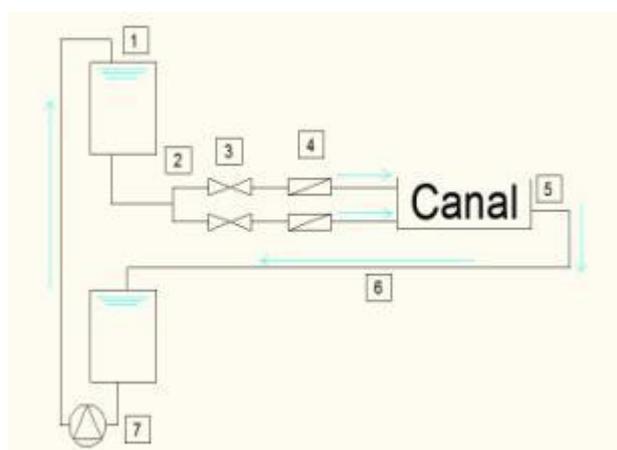
ser determinada apenas como a diferença entre a força gravítica por unidade de área e a força de atrito junto ao fundo por unidade de área, dado que passarão a existir gradientes longitudinais da altura de água e da velocidade média longitudinal, assim como gradiente transversal da velocidade transversal.

Evidências experimentais de que a ocorrência de transferência de massa provoca o aumento da tensão aparente podem ser encontradas em escoamentos não uniformes em canais prismáticos com secção composta (Proust *et al.* 2010) ou ainda, de um modo mais evidente, em escoamentos com LP enviesado (Elliot e Sellin 1990, Proust *et al.* 2010).

3. Descrição da campanha experimental

3.1. Instalação experimental

Os ensaios foram realizados num canal de secção composta, em circuito fechado, existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Canal Veiga da Cunha) composto por 2 reservatórios, sistema de bombagem, sistema de seccionamento, medidores de caudais, sistema de comportas e um longo canal onde se realizam as medições relevantes para o presente estudo (Fig. 12).



Legenda:

- 1 – Reservatório elevado.
- 2 – Separação dos caudais em “Forquilha”.
- 3 – Válvulas de seccionamento.
- 4 – Medidores de caudal
- 5 – Sistema de comportas.
- 6 – Tubagem subterrânea.
- 7 – Sistema de bombagem.

Figura 12 – Esquema do circuito fechado da instalação experimental

O canal tem aproximadamente 10,0 m de comprimento por 2,0 m de largura. A secção transversal é simétrica e é formada por um leito principal com 0,4 m de rasto e dois leitos de cheia com 0,7 m de largura. O leito principal tem uma profundidade de 0,1 m e a transição entre leitos é feita por margens com inclinação de 45° como indicado na Fig. 13. Longitudinalmente, o canal tem um declive de $1,10 \times 10^{-3}$ m/m.

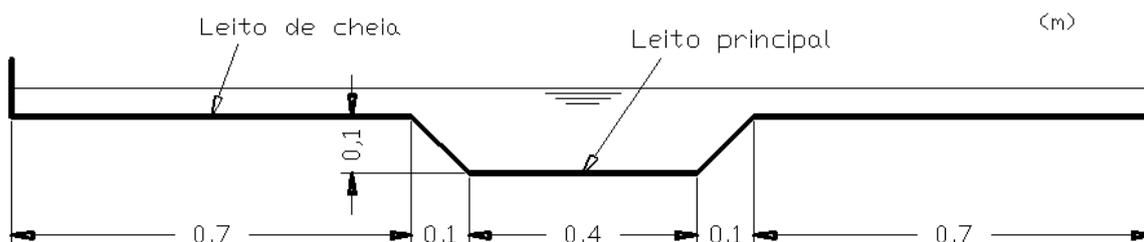


Figura 13 – Perfil transversal do canal de secção composta.

Sendo de vital importância para este trabalho administrar a entrada controlada do caudal tanto nos leitos de cheia como no leito principal e de acordo com o Cap. 2.2.2 a alimentação dos leitos de cheia e do leito principal é feita de forma separativa, *i.e.* existem duas tubagens independentes dispostas em “forquilha”, cada uma com válvula de seccionamento e caudalímetro. No início do canal colocaram-se placas em metal a separar o LP dos LC até a contracção e a estabilização do caudal estar concluída.

Para a estabilização do escoamento na parte de montante foram utilizadas várias técnicas em simultâneo (ver Fig. 14). Colocaram-se tijolos cerâmicos furados na zona de abastecimento com o intuito de direccionar inicialmente o escoamento e também criar uma zona de reservatório, de seguida foram colocados difusores (tubos de plástico), com uma configuração em favo de abelha que induzem a distribuição uniforme dos caudais, transversalmente, em cada secção. Esta contracção provoca uma perda de carga devido à substancial acumulação de água a montante dos difusores com um respectivo aumento da velocidade a jusante dos mesmos. Para controlar a formação de ondulações e estabilizar a superfície livre, foram ainda colocados flutuadores com movimento vertical regulável (placas de poliestireno nos leitos de cheia e contraplacado em madeira no leito principal) imediatamente a jusante dos difusores.



Legenda:

- 1 – Elementos de separação entre leitos (placas metálicas).
- 2 – Tijolo furado.
- 3 – Difusores
- 4 – Placa de poliestireno
- 5 – Sistema regulável em contraplacado de madeira.
- 6 – Leito de cheia.
- 7 – Leito Principal.

Figura 14 – Elementos utilizados a montante para estabilização do escoamento

O posicionamento dos equipamentos de medição na direcção longitudinal e transversal ao canal foi efectuado com uma plataforma móvel (carro de equipamento) assente em calhas com marcação da distância a que se encontra do início do canal.

No carro de equipamento existe um suporte regulável com fita métrica para fixar os equipamentos de medição na direcção transversal pretendida e para controlar a altura da

medição o suporte é munido de um hidrómetro de ponta amovível com precisão de 0,1 mm (nónio acoplado).

Para assegurar o regime uniforme é necessário garantir um nível constante da água. Para este fim o canal dispõe a jusante um sistema de comporta ajustável, com eixo horizontal e duas placas metálicas amovíveis que permitem a regulação fina dos níveis nos leitos de cheia. O controlo do nível da água é realizado a montante e a jusante, através de tubagens que fazem a ligação entre o fundo do canal e um reservatório equipado com hidrómetro (Fig. 15). Através das leituras destes nas tubagens com o auxílio de uma curva de referência (cota zero previamente definida) pode ser determinado o nível de água no canal.



Figura 15 – Reservatório com hidrómetro com ligação ao fundo do canal

3.2. Equipamentos de medição e controlo

3.2.1. Medidores electromagnéticos de caudal (Caudalímetros)

Para controlar a quantidade de água proveniente do reservatório elevado utilizaram-se dois caudalímetros com precisão de 0,1 l/s no início do canal, um para medir o caudal do leito principal e o outro para medir o dos leitos de cheia (Fig. 16).



Figura 16 – Caudalímetros situados no início do canal

Apesar destes equipamentos serem muito precisos, com o aumento da quantidade de água havia alguns desvios entre o caudal de referência (Q_0) e o caudal medido (Q). Por esta razão foi necessário obter inicialmente tabelas de ajustamento entre os valores fornecidos pelo fabricante e os valores reais para proceder a pequenas correcções e desta forma minimizar a diferença entre os dois caudais. A relação da calibração para o leito principal e para os leitos de cheia eram respectivamente

$$Q_0 = 0,9982Q - 0,04 \quad (21)$$

$$Q_0 = 0,99532Q \quad (22)$$

3.2.2. Tubo de Pitot

O tubo de Pitot é um instrumento frequentemente utilizado para medições de velocidades de escoamentos em ensaios laboratoriais por ser relativamente fácil de manusear e também pelas suas dimensões que permitem realizar medições perto do fundo dos canais (Fig. 17).



Figura 17 – Tubo de Pitot

Na Fig. 18 é representado o princípio de funcionamento do tubo de Pitot e é possível verificar que na extremidade de cada tubo existe uma abertura, que deve estar alinhada contra o escoamento, ligada a um canal interior para efectuar a medição da carga hidráulica $H = (p/\gamma) + z + (u^2/2g)$. À volta do tubo existem orifícios de menores dimensões ligados a tubo exterior que medem a cota piezométrica $h = (p/\gamma) + z$. A diferença entre as duas alturas (Altura cinética) permite chegar finalmente á expressão da velocidade medida:

$$u = \sqrt{2g(H - h)} \quad (23)$$

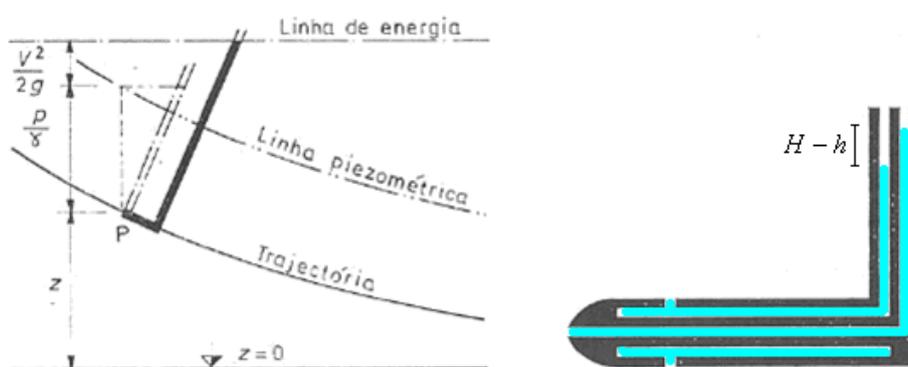


Figura 18 – Representação esquemática do funcionamento do tubo de Pitot (adaptada de Quintela, 1981).

Para escoamentos com velocidades superiores a 1 m/s as suas medições normalmente são muito próximas das reais e o seu uso é recomendável (Boiten 2000). Contudo para escoamentos com velocidades mais baixas existe uma maior dificuldade em quantificar a diferença $H-h$ devido à proximidade dos dois valores. Por esta razão ligou-se o tubo de Pitot a um transdutor diferencial de pressão (Fig. 19) através de tubos de borracha flexíveis, registando com maior precisão as diferenças de pressão correspondentes a velocidades de escoamento relativamente baixas ($u \geq 0,10$ m/s). Os valores eram recolhidos por um condicionador de sinal que permite a aquisição contínua do sinal eléctrico (em Volts) e enviados para um computador onde finalmente se procedia á conversação da voltagem em velocidade local.



Figura 19 – Transdutor diferencial de pressão

Para este sistema de registo de velocidade funcionar correctamente, é necessário efectuar uma calibração para relacionar o valor da tensão medida com a velocidade de forma correcta. Assim sendo é necessário utilizar dois reservatórios interligados e recolher vários valores de tensão para diferentes níveis de água devido á diferença de pressão. Quando os dois reservatórios têm o mesmo nível de água o transdutor indica a tensão correspondente ao zero da expressão e como a resposta do equipamento é linear o registo de vários pontos permite obter a recta de calibração, cuja qualidade é verificada com base no coeficiente de determinação, R^2 , que deve ter o valor próximo da unidade (Fig. 20).

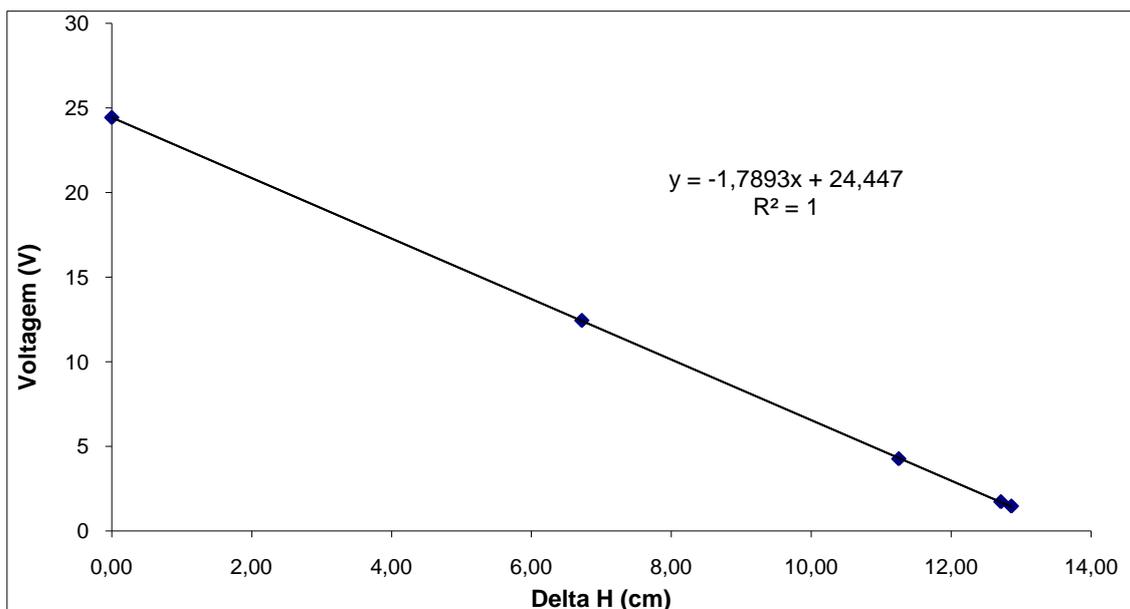


Figura 20 – Exemplo de curva de calibração do captor diferencial de pressões

É importante referir que devido á grande sensibilidade destes aparelhos, principalmente do transdutor diferencial de pressões, tanto as medições como as calibrações devem ser efectuadas com algum cuidado evitando movimentos bruscos ou qualquer toque no sistema enquanto uma medição está a ser efectuada. A existência de bolhas de ar dentro dos componentes conduz a resultados erróneos, sendo necessário purgar o ar antes do início de cada calibração e posteriormente evitar retirar o tubo de Pitot de dentro do líquido entre medições. De forma a obter resultados fidedignos devem efectuar-se calibrações regularmente e durante as medições deve-se actualizar os “zeros” da curva de calibração pois pode haver diferenças substanciais entre os valores no inicio das medições e os obtidos mais tarde.

3.2.3. Tubo de Preston

A medição das tensões de arrastamento foi efectuada recorrendo à técnica do tubo de Preston (Preston, 1954). Segundo este autor, a tensão de arrastamento pode ser obtida através de relações com o gradiente entre as pressões estática e dinâmica dadas pelo tubo de Pitot colocado junto ao fundo.

A obtenção das tensões de arrastamento com o tubo de Preston seguiu a calibração sugerida em Patel (1965) para fronteiras lisas. Nesse artigo sugere-se o cálculo do parâmetro

$$x^* = \log_{10} \left(\frac{\Delta P d^2}{4 \rho v^2} \right) \quad (24)$$

em que $\Delta p = H - h$ é a diferença de pressão (Pa) e o parâmetro d é o diâmetro do tubo de Pitot (m). Consoante o valor (x^*) deve ser escolhida a expressão a partir da qual se calcula um novo parâmetro (y^*),

$$0 < x^* < 1,5 \quad \Rightarrow \quad y^* = 0,5x^* + 0,037 \quad (25)$$

$$1,5 < x^* < 3,5 \quad \Rightarrow \quad y^* = 0,8287 - 0,181x^* + 0,1437x^{*2} - 0,006x^{*3} \quad (26)$$

$$3,5 < x^* < 5,3 \quad \Rightarrow \quad x^* = y^* + 2 \log_{10}(1,95y^* + 4,1) \quad (27)$$

É possível obter-se finalmente as referidas tensões de arrastamento (τ_0) através da seguinte expressão,

$$y^* = \log_{10} \left(\frac{\tau_0 d^2}{4 \rho v^2} \right) \quad (28)$$

O gradiente de pressões deve estar entre os limites impostos pelas equações acima mencionadas (26) e (27) para poder utilizar as correspondentes curvas de Patel, como é o caso dos do presente estudo. Contudo, como apenas foram utilizadas medições bidimensionais e na zona das interfaces podem existir fenómenos tridimensionais, os intervalos e as curvas utilizadas podem nem sempre ser as mais correctas.

3.2.4. Sondas Ultra Sónicas

A medição de velocidades instantâneas em escoamentos de superfície livre é por si só um tema complexo e que levanta questões quanto à fiabilidade dos resultados em função dos aparelhos de medição, das calibrações, da disposição correcta das suas componentes, entre outras variáveis. Por esta razão deve-se ter em conta os trabalhos já realizados para obtenção de velocidades instantâneas e seguir uma metodologia que tenha provado conseguir bons resultados.

Por esta razão as medições foram efectuadas utilizando o sistema *Ultrasonic Velocity Profiler* (UVP). Apesar de a sua utilização ser recente e pouco comum (e.g. Kantoush *et al.*, 2008), o sistema UVP tem permitido obter resultados de boa qualidade principalmente em escoamentos pouco profundos (Takeda, 1995).

O sistema UVP é constituído pelas sondas (Fig. 21), responsáveis pela emissão/recepção dos sinais ultra sónicos, e pela unidade UVP-DUO da Met-Flow responsável pela recepção, registo e tratamento dos valores recolhidos para posteriormente os transmitir para um computador com o *software* adequado.



Figura 21 – Sonda ultra-sónica UVP (Retirado de Met-Flow, 2002)

O princípio de funcionamento do sistema UVP baseia-se na emissão de um sinal ultra sónico (feixe de leitura) que viaja segundo o eixo previamente designado pelo utilizador e a recepção do eco (funcionamento dual, emissor/receptor) correspondente à sua intercepção com partículas existentes no líquido escoado. Para uma descrição mais pormenorizada do funcionamento deve ser consultado Takeda (1995) e Met-Flow (2002). Uma representação esquemática de um feixe de leitura com frequência de 4 MHz é apresentada na Fig. 22, onde

está presente uma lista dos principais parâmetros e características dos transdutores. É importante saber o volume de cada amostra em medições ultra-sónicas mas nem sempre é fácil de o identificar (Fernandes *et al.*, 2010).

A distância da sonda ao ponto de focagem e o ângulo de divergência são funções do diâmetro da sonda e da frequência utilizada (Met-Flow, 2002). No presente trabalho foram utilizadas sondas com 5 mm de diâmetro e uma frequência de 4 MHz e de acordo com as tabelas fornecidas em Met-Flow (2002) a distância da face posterior da sonda ao ponto de focagem é de 16,9 mm e o ângulo de divergência é de $2,2^\circ$. Os parâmetros de 1 a 7 são definidos pelo utilizador.

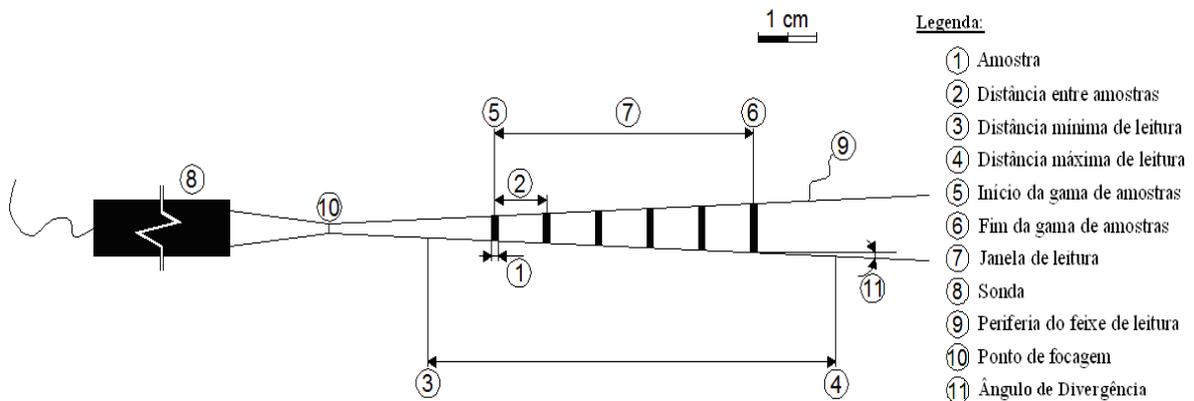


Figura 22 – Representação esquemática do feixe de leitura emitido pelas sondas UVP (adaptada de Fernandes *et al.*, 2010)

O volume de cada amostra é portanto um cone com bases planares cujos diâmetros são definidos pela divergência do feixe e da sua distância à sonda enquanto a espessura é definida pelo utilizador. A velocidade medida é a média das velocidades das partículas, em cada um desses volumes de cada “janela de leitura” (Fernandes *et al.*, 2010).

A utilização das sondas UVP é mais usual para medições 1D, contudo também é possível efectuar medições 2D com qualidade (Takeda e Kikura, 2002, Kantoush *et al.*, 2008), permitindo obter ambas as velocidades longitudinais e transversais bem como as tensões tangenciais. Para tal, recorreu-se à técnica de *flow mapping*, ou seja, da utilização de vários transdutores para medições em simultâneo de um escoamento (Met-Flow, 2002) num ponto conhecido. Ao medir velocidades em simultâneo para o mesmo ponto obtém-se um vector, V_t , (ver Fig. 23), que após uma relação trigonométrica se pode traduzir na componente longitudinal (u) e transversal (v) da velocidade real.

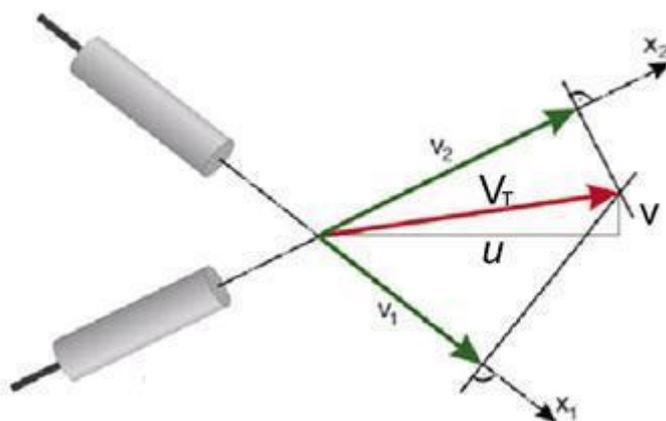


Figura 23 – Flow mapping; decomposição ortogonal do vector (adaptado de Met-Flow, 2002)

Esta configuração das sondas aumenta o número de parâmetros que têm de ser ajustados pelo utilizador e conseqüentemente existe uma maior probabilidade de haver desvios da velocidade real. É essencial ter um posicionamento estável das sondas de forma a não alterar o ângulo entre elas, pois em medições de velocidades pequenas o mínimo desvio no ângulo altera consideravelmente o valor do vector. Para evitar isto, foi concebido um apoio fixo para os transdutores se manterem sempre na mesma configuração (Fig. 24).



Figura 24 – Apoio fixo para os transdutores

Ao interpretar os valores registados no computador é necessário ter em conta que os resultados das medições UVP são o resultado de um vector projectado entre as duas sondas e por vezes os picos obtidos são significativamente maiores que as médias.

Para eliminar estes desvios, todos os registos efectuados pelas sondas UVP são sujeitos a um procedimento de “despicagem” proposto por Goring e Nikora (2002) e implementado no programa MatLab. Na Fig. 25 apresenta-se um registo de velocidades antes e depois da operação de “despicagem”. Pode constatar-se que o procedimento de Goring e Nikora (2002) permite eliminar os picos maiores que estão associados a erros de medição.

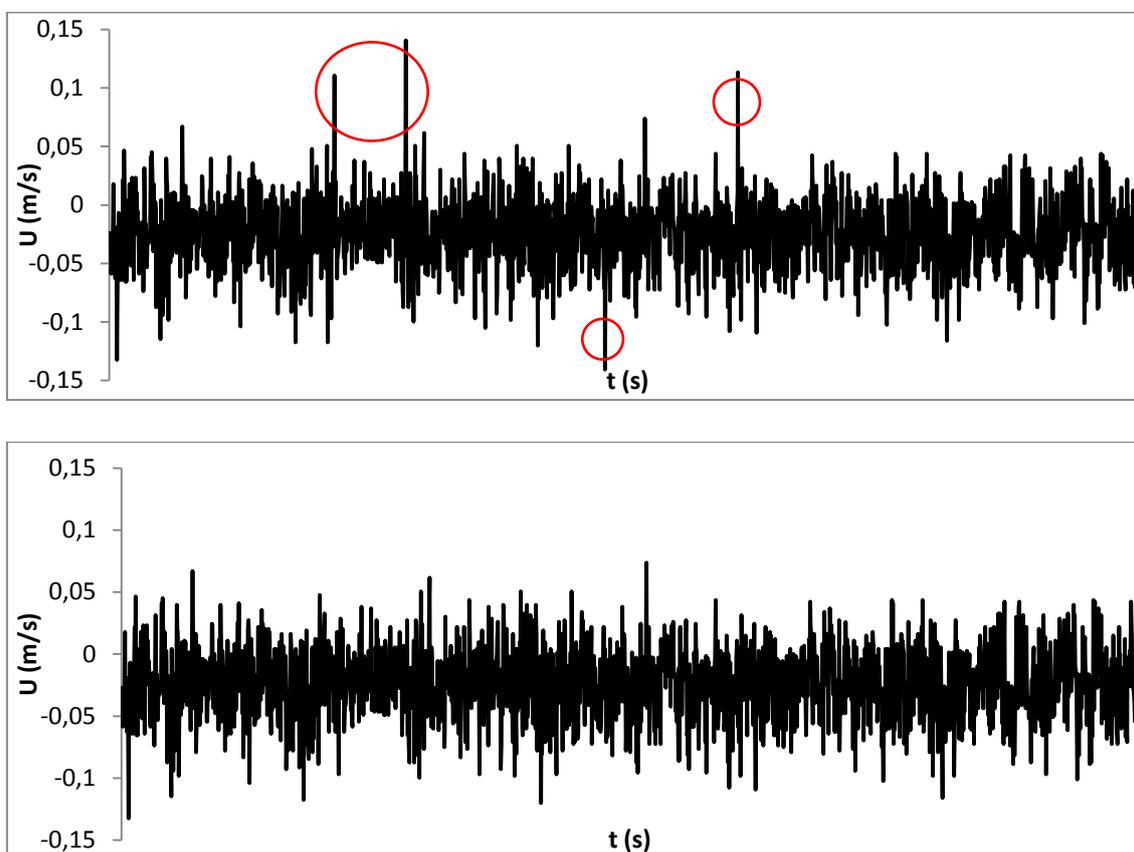


Figura 25 – Medição de um perfil de velocidades utilizando Flow-mapping. Em cima os dados fornecidos pelo software, em baixo os mesmos dados após o método de despicagem proposto por Goring e Nikora (2002)

Como já foi referido, o sistema UVP regista o eco do som reflectido pelas partículas em suspensão no fluido e apesar de na maioria dos fluidos existirem partículas reflectoras suficientes para obter os registos (Met-Flow, 2002) é comum recorrer à introdução de partículas artificiais (*seeding*) para aumentar o número de reflexões e consequentemente melhorar a qualidade das medições (Ozaki *et al.*, 2002, Wiklund *et al.*, 2006, Kantoush *et al.*, 2008). Na escolha do material a utilizar foi seguido o estudo efectuado por Fernandes *et al.* (2010) no qual foram testados diversos materiais com densidades perto da unidade e diâmetro próximo do sugerido em Met-Flow (2002). Desse estudo concluiu-se que os melhores resultados (em comparação com os resultados do tubo Pitot) foram os obtidos utilizando casca de avelã. Também quanto ao número de “picos”, ou seja, a quantidade de desvios da velocidade média do escoamento, a casca de avelã é o *seeding* que melhor se comporta, obtendo menor número de desvios da velocidade média do escoamento.



Figura 26 – Introdução de *seeding* no escoamento. Lado esquerdo, preparação da concentração de casca de avelã; lado direito, reservatório a montante do canal.

A introdução de partículas é feita a montante através de um reservatório ligado a um tubo com diâmetro aproximadamente de 5 mm com válvula de seccionamento (para evitar desperdício de *seeding* entre medições). O tubo deve estar sempre alinhado a montante com a posição a analisar pois as partículas seguem o escoamento efectuado pelo fluido.

3.3. Ensaio realizados

Para a realização deste trabalho foi necessário obter dados suficientes para caracterizar correctamente a evolução dos perfis de velocidade, dos perfis de tensões junto ao fundo e também das tensões de Reynolds. Tendo em consideração o tempo disponível, para esta análise ser o mais completa possível, foram estudadas 4 secções ao longo do canal (Fig. 27), a 3 m (X3000), 5 m (X5000), 6 m (X6000) e 7,5 m (X7500) do início do canal. A escolha destas secções tem como principal objectivo verificar o desenvolvimento dos diferentes fenómenos, em especial em regime não uniforme, ao longo do canal. Através das duas últimas secções pode-se identificar uma eventual estagnação de fenómenos e concluir que estes se encontram totalmente desenvolvidos. Durante a utilização das sondas UVP verificou-se que na secção X3000, devido às grandes transferências de quantidade de movimento iniciais associadas à sensibilidade do aparelho, não se obteve resultados de boa qualidade e por essa razão a secção estudada passou a ser 0.5 m (X3500) a jusante para haver uma melhoria nos resultados.

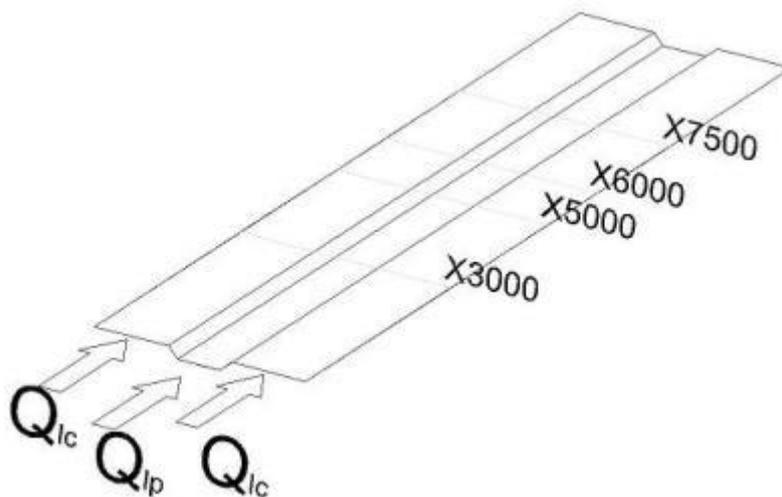


Figura 27 – Esquematização das secções estudadas ao longo do canal

O presente trabalho foi efectuado com uma altura relativa, *i.e.* um rácio entre as alturas de escoamento nos leitos de cheia e no leito principal igual a 0,3 ($h_r = 0,3$).

As condições de regime uniforme pressupõem que a distribuição de caudais entre as subsecções seja constante ao longo do canal. Desta forma, para garantir a minimização das transferências de massa entre os leitos, o regime uniforme foi obtido através de um procedimento iterativo (*cf.* Fig. 28).

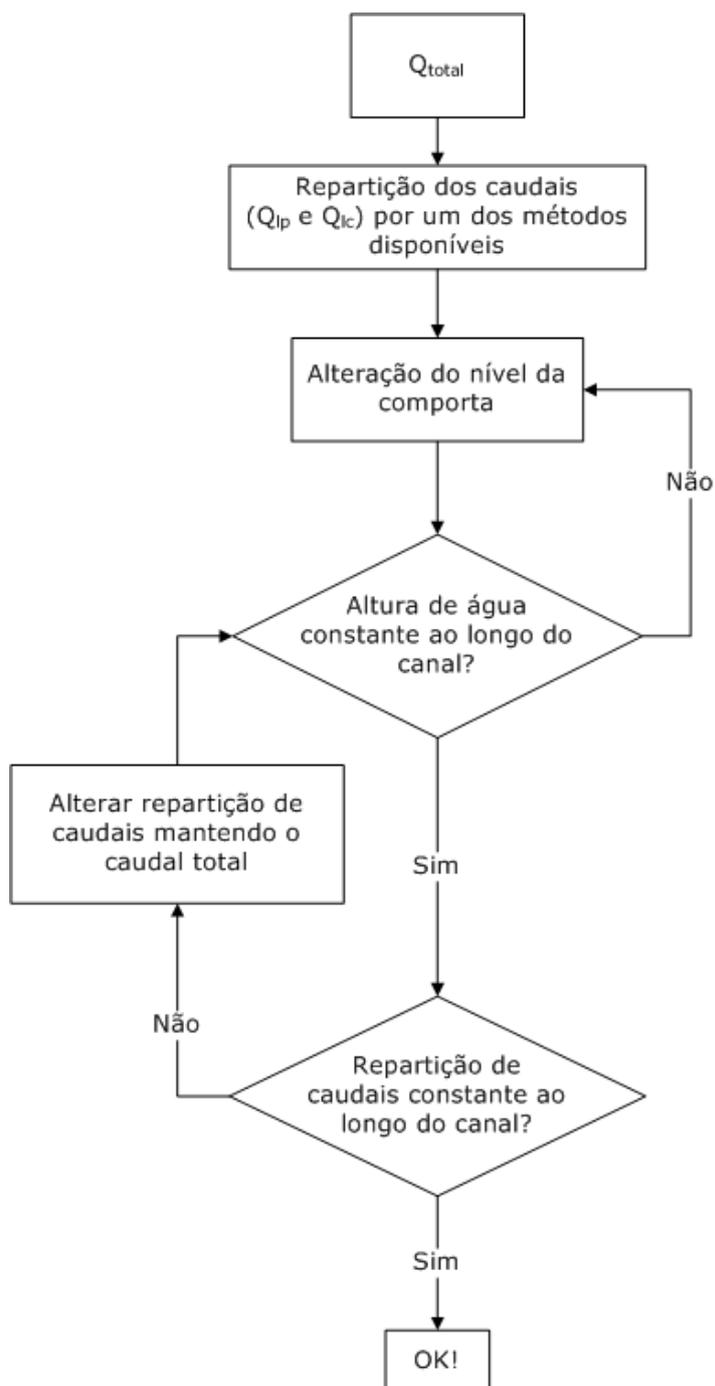


Figura 28 – Procedimento para a obtenção do regime uniforme

Os caudais obtidos através deste procedimento, para uma altura relativa de 0,3 são 52,2 e 26,4 l/s para o leito principal e leitos de cheia, respectivamente.

A partir do escoamento em Regime Uniforme (RU) foram feitas 4 destabilizações. Mantendo o caudal total; uma em que se transferiu 19% do caudal do leito de cheia para o leito principal (-19%) enquanto nas outras 3 se transferiu 19%, 38% e 56% do caudal do leito principal para o leito de cheia (+19%, +38% e +53%). No Quadro 1 apresenta-se os caudais a introduzir de forma a obter as várias destabilizações para uma altura relativa de 0,3.

Quadro 1 – Caudais das várias destabilizações

	Leito Principal (l/s)	Leito de Cheia (l/s)
RU	54.2	26.4
-19%	59.2	21.4
+19%	49.2	31.4
+38%	44.2	36.4
+53%	40.2	40.4

No Quadro 2 apresenta-se as secções que foram analisadas com o tubo de Pitot e com as sondas UVP para cada destabilização.

Quadro 2 – Secções analisadas para cada destabilização

	-19%	RU	+19%	+38%	+53%
Tubo de Pitot		X3000	X3000		
	X5000	X5000	X5000	X5000	X5000
		X7500	X6000		
			X7500		
UVP	X3500	X3500	X3500		
	X5000	X5000	X5000	X5000	X5000
	X6000	X5000	X6000		
		X7500			
	X7500		X7500		

3.4. Procedimento experimental

3.4.1. Malha de medição e procedimento de integração das velocidades

Para obter o perfil médio de velocidades em cada secção foi utilizada uma malha de medição (Fig. 29) composta por 37 posições verticais com espaçamentos de 5 cm no leito principal, 2 cm na zona das interfaces e 10 cm em algumas zonas do leito de cheia. Em cada posição vertical foram registados 5 pontos nos leitos de cheia e 6 no leito principal, desde junto ao fundo (a 1,6 mm correspondente a metade do diâmetro do tubo de Pitot); até 80% da altura de água, e através das equações (29) e (30) foi possível obter a velocidade média em cada vertical.

$$u_{LC}^{méd} = (7,5 \times u_{fundo} + 15 \times u_{20\%} + 20 \times u_{40\%} + 20 \times u_{60\%} + 30 \times u_{80\%}) / 100 \quad (29)$$

$$u_{LP}^{méd} = (2,5 \times u_{fundo} + 10 \times u_{10\%} + 15 \times u_{20\%} + 20 \times u_{40\%} + 20 \times u_{60\%} + 30 \times u_{80\%}) / 100 \quad (30)$$

em que u_{fundo} representa velocidade medida com o tubo de Pitot junto ao fundo; $u_{\#\%}$ a velocidade medida a uma altura correspondente a $\#\%$ da altura de escoamento; $u_{LC}^{méd}$ a velocidade média no leito de cheias e $u_{LP}^{méd}$ velocidade média no leito principal. Para obter estas expressões foi necessário registar vários perfis de velocidade com 18 pontos, calcular a correspondente velocidade média e comparar com equações que estimam a velocidade média considerando apenas valores de velocidade em 5 ou 6 pontos até encontrar as que apresentavam os resultados mais próximos.

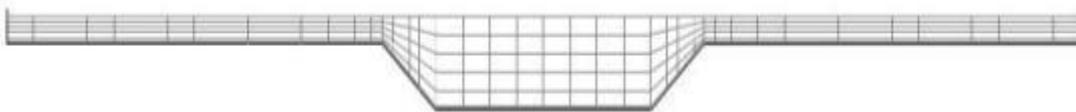


Figura 29 – Malha de leituras ao longo de uma dada secção

As velocidades médias obtidas em cada vertical através das expressões anteriores estão bastantes próximas dos valores das velocidades registadas a 40% da altura de escoamento (Fig. 30). Em escoamentos bidimensionais em canais largos ($b/H > 5$) é válido utilizar esta aproximação como referência (e.g. Cardoso, 1998). Nos registos efectuados com as sondas UVP, houve recurso a esta referência como será demonstrado no capítulo 4.

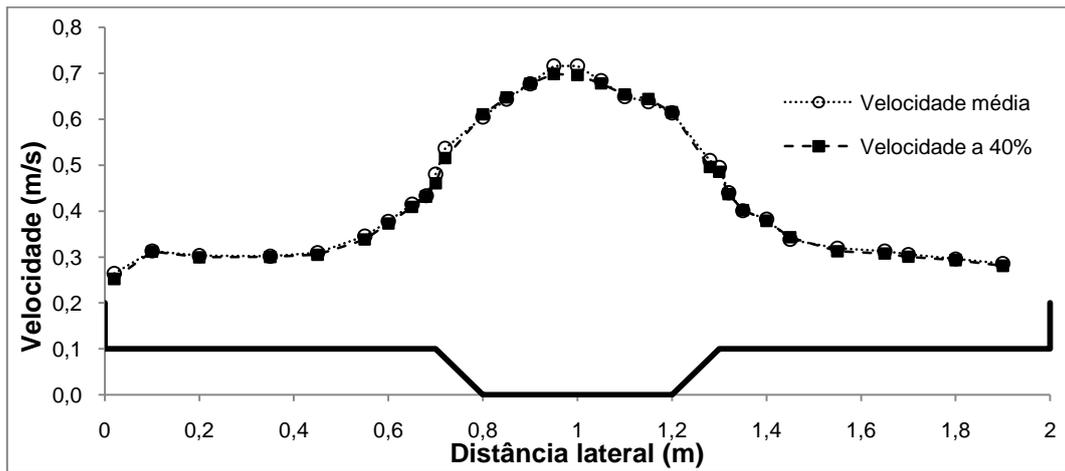


Figura 30 – Comparação entre o perfil de velocidades médias e o perfil registrado a 40% da altura do escoamento

Para obtenção do caudal total que atravessa toda a secção foi utilizado o mesmo procedimento de Pinto (2010) (Fig. 31), ou seja, num comprimento δs suficientemente pequeno para que a variação ΔS da área da secção recta seja desprezável, geralmente entre duas posições verticais da malha de medições, a porção de fluido contida é $(\Delta S)\delta s$. Se o fluido atravessa o plano BC no intervalo de tempo δt , a porção que atravessa o plano num determinado intervalo de tempo 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 neste plano é $(\Delta S)u$.

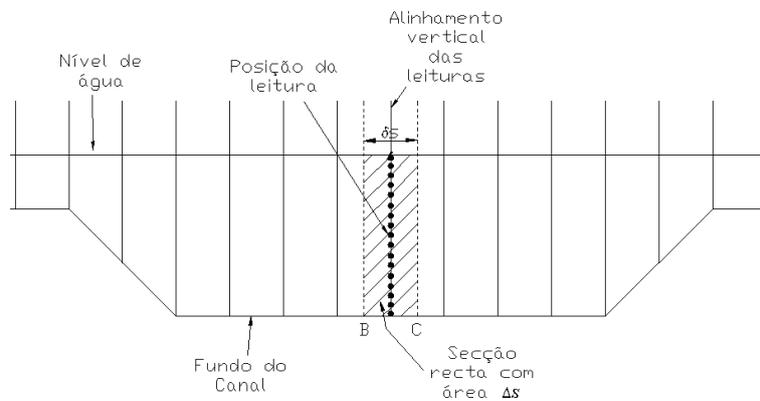


Figura 31 – Esquematização da integração realizada para cálculo do caudal escoado numa determinada secção (retirado de Pinto, 2010)

Na prática, o cálculo do caudal (Q) é o produto da velocidade média \bar{u} obtida em cada secção da malha de medições, pela área da mesma (S), como apresentado na expressão (32);

$$Q = \int u.dS = \bar{u}.S$$

(31)

4. Resultados obtidos

4.1. Regime Uniforme

4.1.1. Desenvolvimento do escoamento ao longo do canal

De acordo com o descrito no Capítulo 3.3 para o Regime Uniforme foram efectuados registos de velocidades em três secções distintas para ser possível analisar o desenvolvimento dos fenómenos em estudo ao longo do canal. A primeira encontra-se apenas a 3 metros (X3000) da alimentação do canal, a seguinte a 5 metros (X5000) e finalmente a 7,5 metros (X7500). Essas secções foram coincidentes com as dos trabalhos efectuados no mesmo canal por Pinto (2010) para poder comparar os resultados com os já existentes para diferentes alturas relativas.

De acordo com a Fig. 32 o perfil de velocidades no centro do canal desenvolve-se de montante para jusante com tendência para uma geometria e posição constante. A semelhança entre os dois perfis das secções mais a jusante está de acordo com a geometria de um perfil de velocidades para escoamentos bidimensionais com superfície livre, apresentando o respectivo desenvolvimento completo da camada limite.

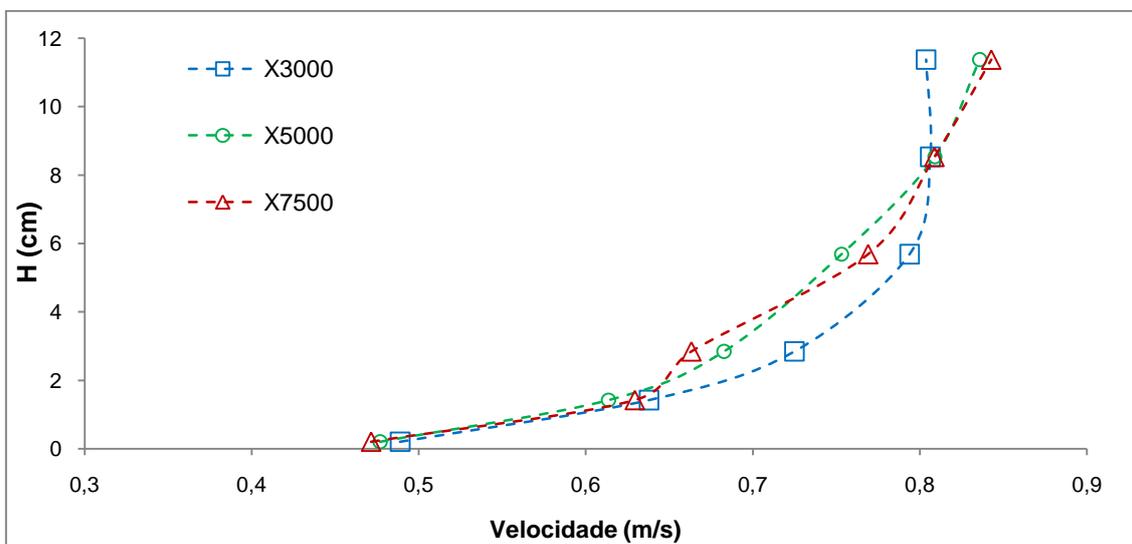


Figura 32 – Perfis de velocidade no centro da secção ao longo do canal

A análise da situação de regime uniforme ($h_r = 0,3$) foi feita com uma altura de escoamento de $H = 0,042$ m, obtida através da introdução de um caudal a montante de 54,4 l/s no leito principal e de 26,2 l/s em cada um dos leitos de cheia.

No Quadro 3 encontram-se os caudais calculados para cada secção, obtidos através da integração das velocidades pelas respectivas áreas de influência (ver secção 3.4), onde se pode verificar que não existe variação significativa de caudal entre leitos. No mesmo quadro

são apresentados os factores de correcção para cada uma das secções. Estes factores correspondem ao rácio entre os caudais medidos no caudalímetro e os obtidos através da integração das velocidades na área de escoamento. Observa-se também que os factores obtidos são próximos da unidade, o que significa que tanto o equipamento como a malha de medição são apropriados.

Quadro 3 – Valores dos caudais obtidos experimentalmente para $hr = 0,3$ em regime uniforme

	Alimentação	X3000		X5000		X7500	
	Q (l/s)	Q (l/s)	Q/Q _{inicial} (%)	Q (l/s)	Q/Q _{inicial} (%)	Q (l/s)	Q/Q _{inicial} (%)
LC	26,2	26,46	101,0%	26,08	99,9%	26,37	100,6%
LP	54,4	54,04	99,3%	54,41	100,0%	54,13	99,5%
	Factor	1,047		1,028		1,041	
	H (m)	0,0422					

As distribuições transversais da velocidade média em profundidade obtidas com o tubo de Pitot conforme a descrito na secção 3.4.1, para as diferentes secções em estudo são apresentadas na Fig. 33. De um modo geral os perfis apresentam um padrão semelhante, com valores da mesma ordem de grandeza ao longo do canal comprovando a situação de regime uniforme excepto alguns casos pontuais que podem ser justificados com a precisão do equipamento de medição utilizado. A velocidade aumenta com a passagem do leito de cheia para o leito principal onde atinge os valores mais elevados, devido ao aumento da altura de água, de uma forma sinusoidal significando que existe uma uniformização de velocidade ao longo da secção. O efeito parede é também visível em ambos os leitos de cheia através de uma ligeira redução das velocidades junto à superfície vertical dos bordos.

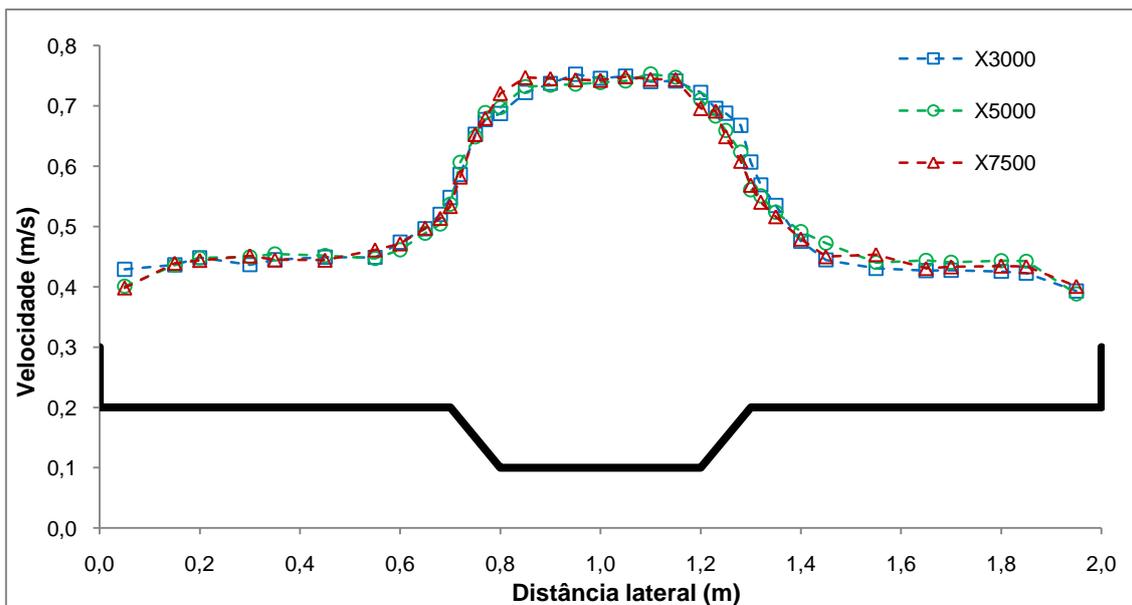


Figura 33 – Perfis das velocidades em secção transversal, obtidos experimentalmente para várias secções (RU)

Tendo em conta a dificuldade de obter resultados de qualidade utilizando sondas UVP associada ao método de *flow mapping*, já referido na secção 3.2.2, apenas foram efectuadas registos de velocidades a 40% e a 60% da altura de água no leito de cheia. A Fig. 34 representa os valores da velocidade longitudinal obtidos na secção X5000, apenas em meia secção considerando haver uma simetria do lado direito. Nota-se que apesar de só haver estas duas alturas existe uma semelhança com as velocidades obtidas com o tubo de Pitot na geometria na distribuição das velocidades; na zona mais próxima do bordo esquerdo as velocidades são mais baixas devido à proximidade com a superfície sólida, ao longo do leito de cheia o valor da velocidade é constante e com a proximidade com a interface vai aumentando gradualmente atingindo os maiores valores na zona central do leito principal. Qualitativamente os valores da velocidade a 40% não diferem em demasia dos valores obtidos com o tubo Pitot, enquanto que a 60% os valores são ligeiramente superiores na zona do leito de cheia.

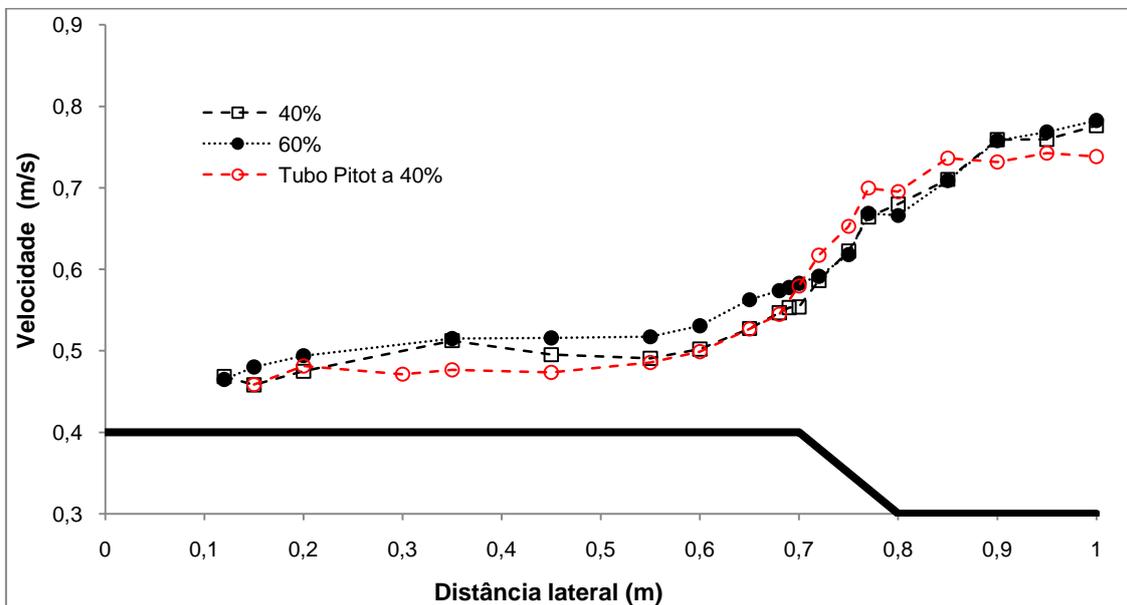


Figura 34 – Velocidade longitudinal registada com sondas UVP, a uma altura de 40% e 60% do nível da água do leito de cheia (X5000)

Com os valores registados nas várias verticais da malha utilizada, elaboraram-se perfis da distribuição das velocidades em cada secção, através da utilização de isolinhas, onde as zonas mais claras representam as zonas com maior velocidade média no tempo. Nas Figs. 35, 36 e 37 apresentam-se as distribuições correspondentes às secções em estudo. Em relação ao leito principal pode-se verificar que existe uma considerável diminuição da velocidade da secção X3000 para a X5000, justificada com a proximidade da primeira secção ao início do canal. No entanto, da secção X5000 para a X7500 as distribuições estão mais semelhantes, o que significa que os fenómenos que derivam da interacção entre os leitos a montante se encontram desenvolvidos e o sistema encontra-se em equilíbrio.

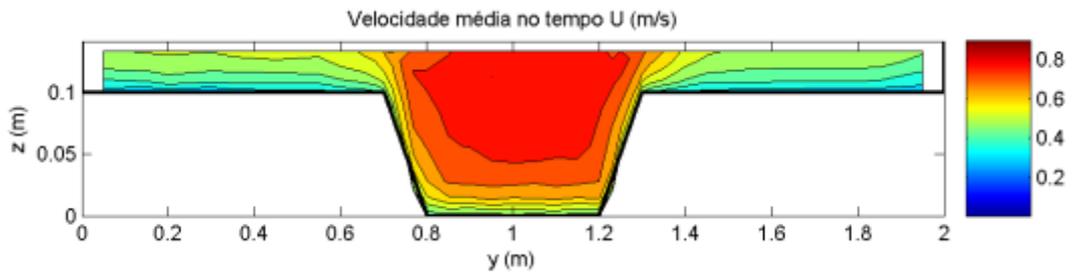


Figura 35 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X3000 (RU $h_r=0,3$)

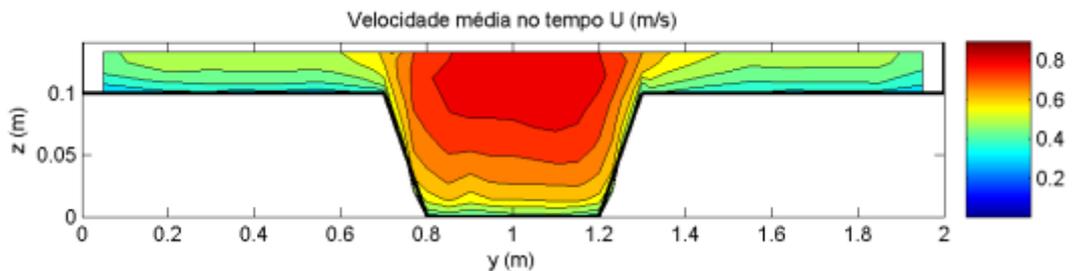


Figura 36 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X5000 (RU $h_r=0,3$)

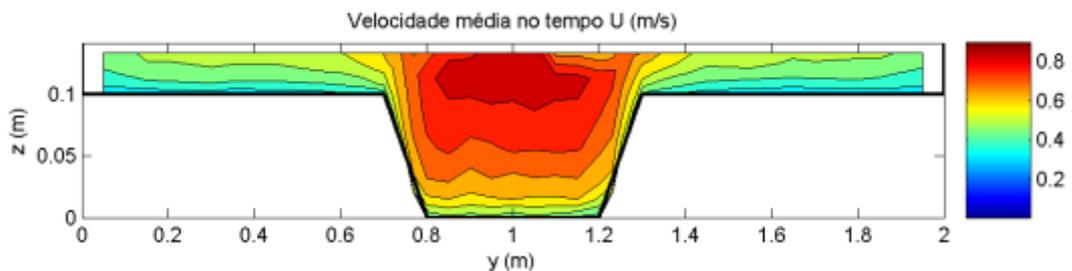


Figura 37 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X7500 (RU $h_r=0,3$)

As tensões de arrastamento obtidas em regime uniforme são apresentadas na Fig. 38, onde se podem identificar algumas semelhanças com o perfil transversal de velocidades, nomeadamente no diz respeito ao aumento das tensões do leito de cheia para o leito principal e também a uma diminuição notória junto a ambos os bordos. Na zona de interface existe um aumento brusco das tensões de arrastamento seguido de uma diminuição aproximadamente a meio da interface e novamente um ligeiro aumento até meio do leito principal. Na zona do leito principal para a secção X7500 existem tensões de arrastamento superiores sugerindo que existe um ligeiro aumento das tensões nas secções mais a jusante mas também a semelhança entre todas as secções comprovam uma situação de regime uniforme.

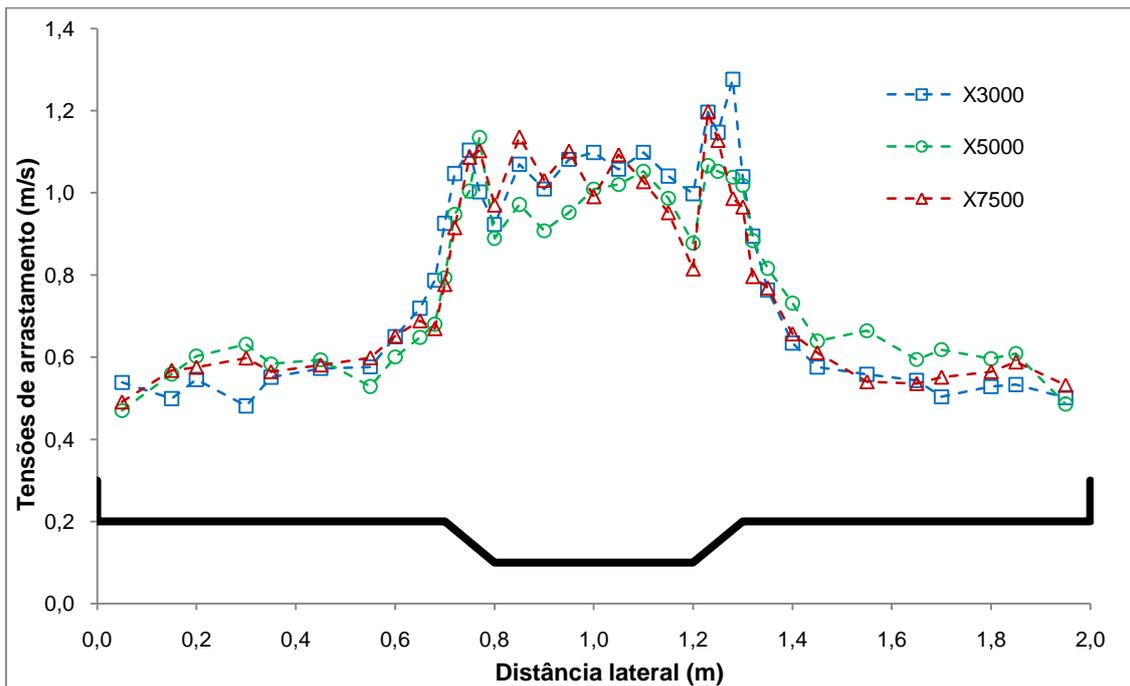


Figura 38 – Perfis de tensões de arrastamento em diversas secções transversais (RU)

4.1.2 . Distribuição transversal da velocidade média em profundidade e dos caudais por leito. Influência da altura relativa.

Este trabalho vem dar seguimento a um estudo já efectuado para outras duas alturas relativas. Neste capítulo vai ser necessário recorrer aos dados obtidos anteriormente para efectuar uma comparação com os dados agora obtidos e assim poder retirar informações sobre a influência da altura relativa no escoamento. Como foi demonstrado anteriormente, a maioria dos fenómenos já se encontram praticamente desenvolvidos na secção mais a jusante do canal (X7500) e por essa razão, foram utilizados os dados obtidos a essa distância para efectuar as comparações com outras alturas relativas.

Na Fig. 39, é apresentado o perfil transversal de velocidades obtido experimentalmente para uma $h_r = 0,3$ e os dados apresentados em Pinto (2010) para $h_r = 0,1$ e $h_r = 0,2$. O aumento da altura água traduz-se num aumento geral de velocidade, mais expressivo nos leitos de cheia (zona onde o aumento de água é mais notório) e mais discreto no leito principal.

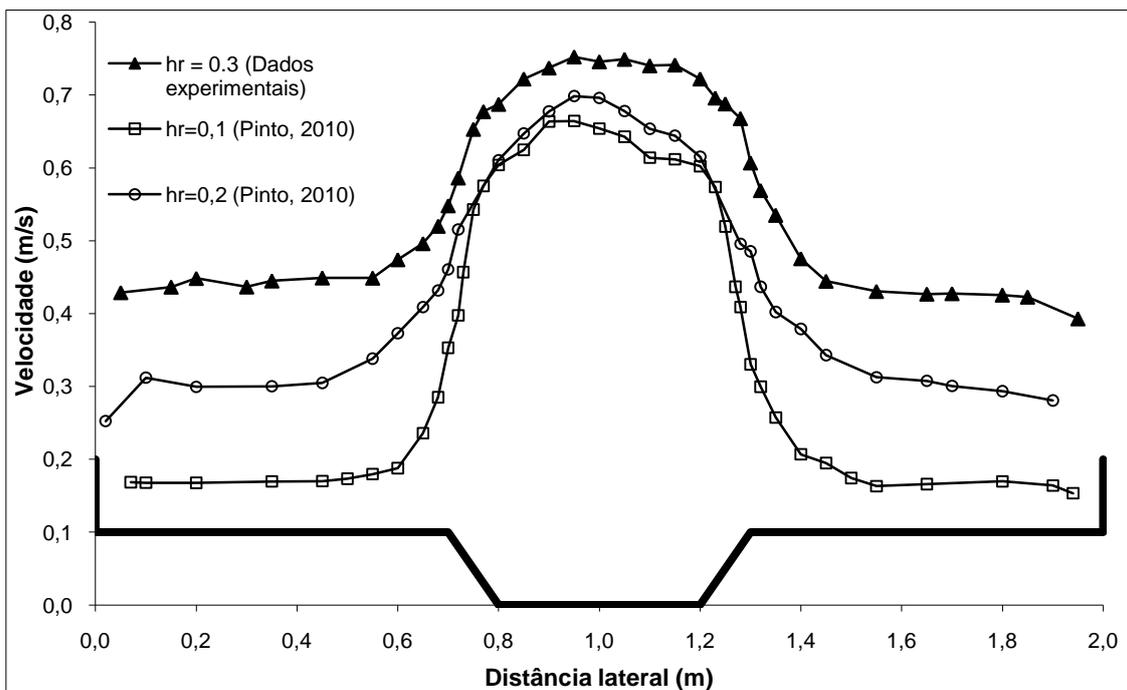


Figura 39 – Comparação dos perfis de velocidade em secção transversal (X7500)

Na interface direita está representada a dimensão da camada de mistura (δ) obtida para $h_r = 0,3$, que de acordo com a secção 2.1.2.3 representa a zona de transição da velocidade do leito de cheia para o leito principal. De acordo com Uijtewaal e Boij (2000) existe uma diminuição de δ para alturas de escoamento pequenas. Contudo, os dados obtidos anteriormente em Pinto (2010) quando comparados com δ da altura relativa agora estudada (Quadro 4) indicam que o aumento para $h_r = 0,3$ não acompanhou a tendência sugerida por aqueles autores para aumentar δ , mas pelo contrário, houve uma ligeira diminuição que pode ser justificada pelo

aumento de velocidades no leito principal que influencia directamente o cálculo da dimensão da camada de mistura.

Quadro 4 – Dimensões da camada de mistura para diferentes alturas relativas (Dados de $h_r = 0,1$ e $h_r = 0,2$ retirados e revistos de Pinto, 2010)

$\bar{\delta} (h_r = 0,1)$	0,134 m
$\bar{\delta} (h_r = 0,2)$	0,241 m
$\bar{\delta} (h_r = 0,3)$	0,215 m

Como já havia sido feito em Pinto (2010) houve também uma preocupação em relacionar os resultados experimentais com os de outros trabalhos já realizados para avaliar a sua veracidade. Para isso foi analisado o trabalho efectuado por Myers *et al.* (2001) cujos ensaios tiveram lugar no UK Flood Channel Facility (FCF) dos Laboratórios HR Wallingford Ltd., interessando apenas o trabalho feito na série 2 da fase A que apresenta as características semelhantes às do presente trabalho.

Na Fig. 40 estão representados os resultados obtidos ($h_r = 0,3$) bem como os de Pinto (2010) que estão de acordo com os propostos por Myers *et al.* (2001), ou seja, ao aumentar a altura relativa a velocidade em ambos os leitos também aumenta, aproximando-se a velocidade entre ambos e consequentemente os valores da velocidade de ambos os leitos convergem para o valor de velocidade da secção global (U_{tot}).

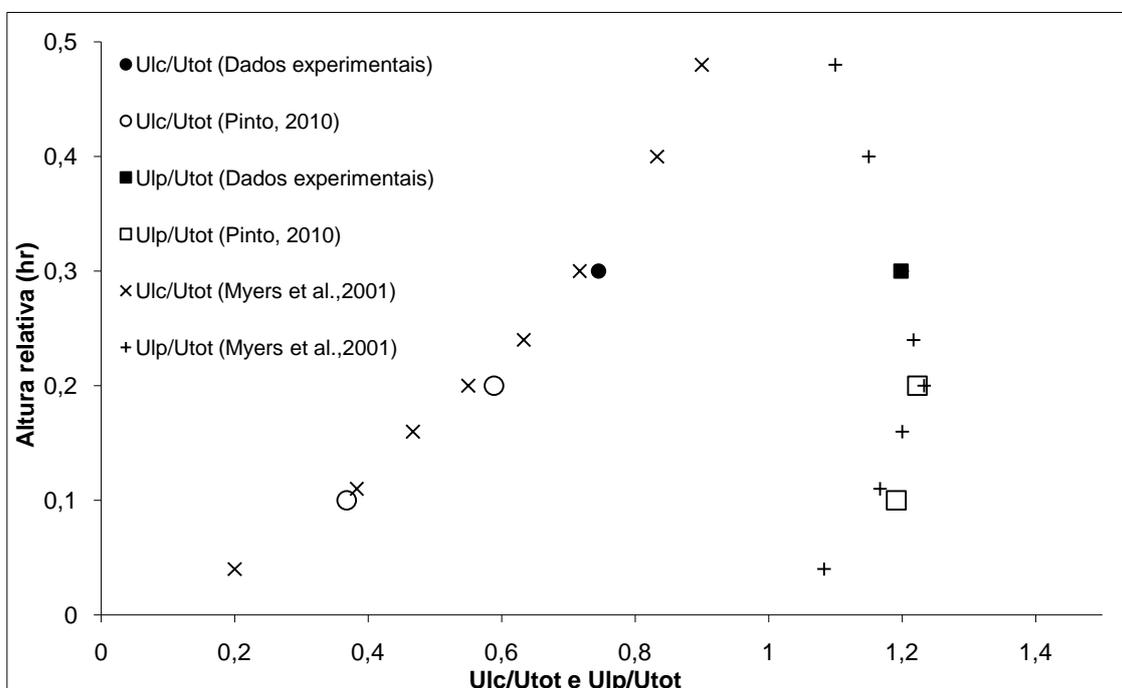


Figura 40 – Rácio das velocidades médias do leito principal e do leito de cheia pela velocidade média da secção total

A convergência dos rácios da velocidade para o valor unitário é apresentada na Fig. 41, representando a aproximação da velocidade entre os leitos com o aumento da altura relativa.

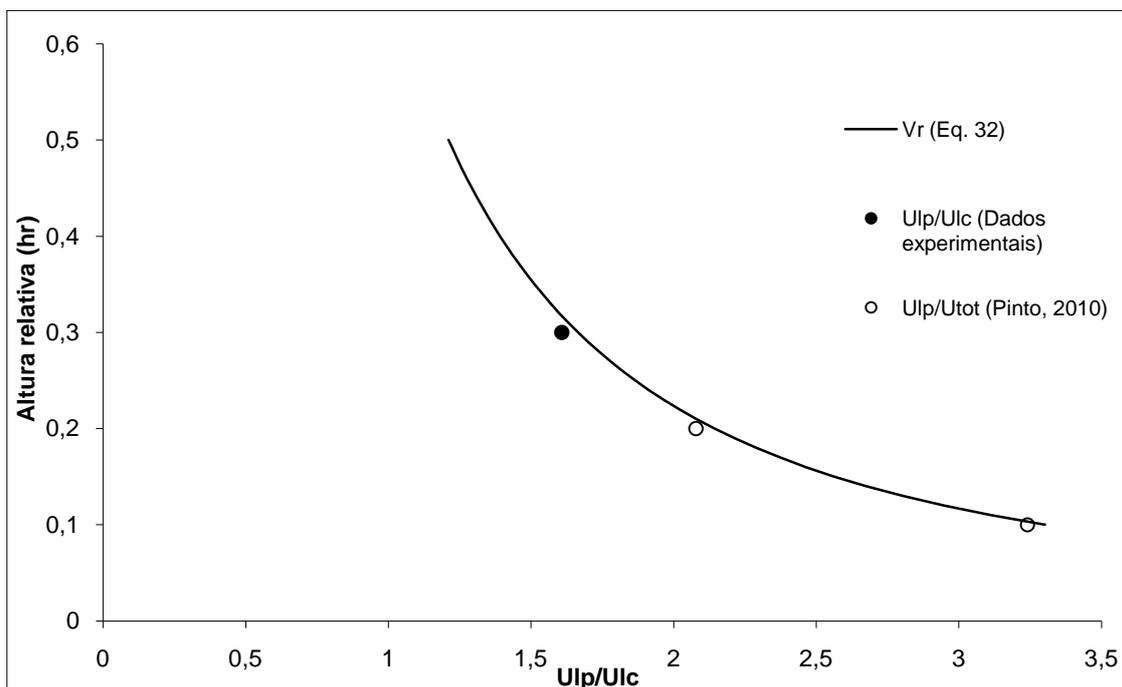


Figura 41 – Rácio da velocidade média no leito principal pela velocidade média no leito de cheia

Os dados obtidos aproximam-se dos valores apresentados por Myers *et al.* (2001) obtidos através da expressão

$$V_r = K(h_r)^k \quad (32)$$

Onde V_r é igual ao valor do rácio da velocidade média do leito principal (U_{lp}) pela (U_{lc}), variando com a altura relativa (h_r). Os valores do coeficiente K e do expoente k , na Fase A da série 2 do FCF apresentados por Myers *et al.* (2001) são de 0,786 e de -0,623, respectivamente.

Em relação aos caudais obtidos através da integração das velocidades pelas áreas de influência (ver secção 3.4) com o aumento da altura relativa também se verifica a aproximação dos valores de ambos os leitos que tendem para um único valor (Fig. 42).

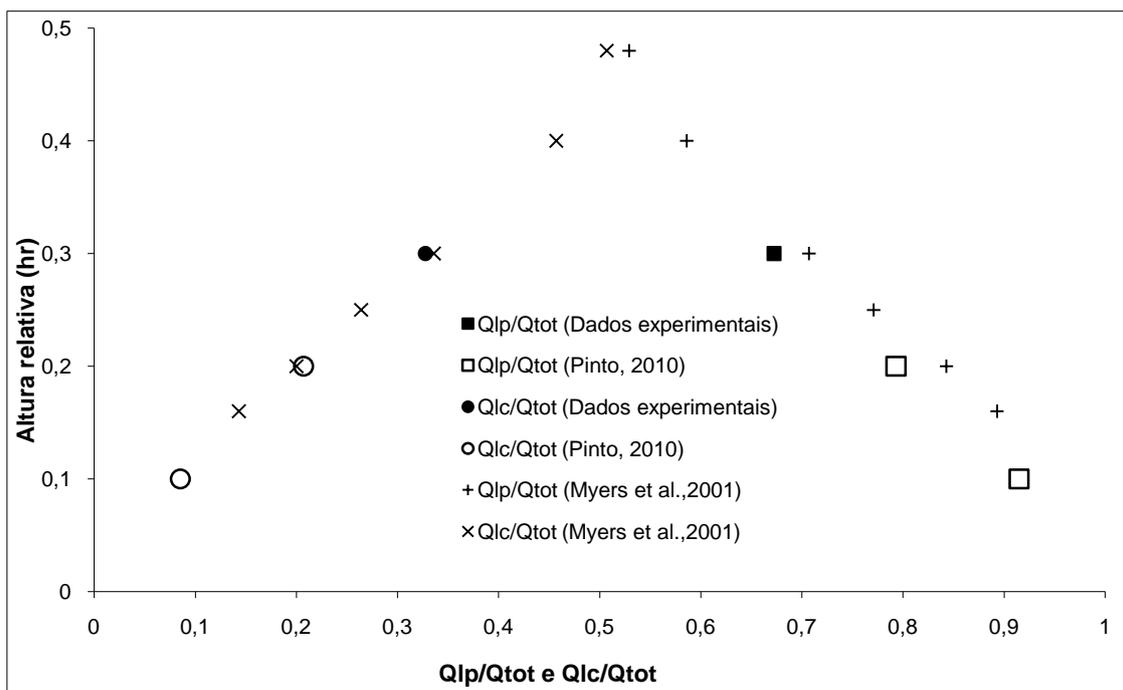


Figura 42 – Rácio do caudal do leito principal e do leito de cheia pelo caudal total

Os resultados obtidos foram posteriormente comparados com a expressão proposta por Myers *et al.* (2001)

$$Q_r = G(h_r)^g \quad (33)$$

Onde Q_r representa o rácio entre o caudal do leito principal pelo caudal do leito de cheia, em função de uma altura relativa (h_r). O coeficiente G tem um valor 0,293 e o valor exponencial de g é de -1,618 (FCF, série 2, Fase A).

Observando a Fig. 43 nota-se que os valores obtidos têm a mesma ordem de grandeza que os apresentados por Myers *et al.*(2001) pois coincidem com os da expressão (34). Com o aumento da altura de água o rácio entre o caudal de ambos os leitos tende para o valor unitário significando que os valores dos caudais vão convergindo para o mesmo valor com o aumento de h_r .

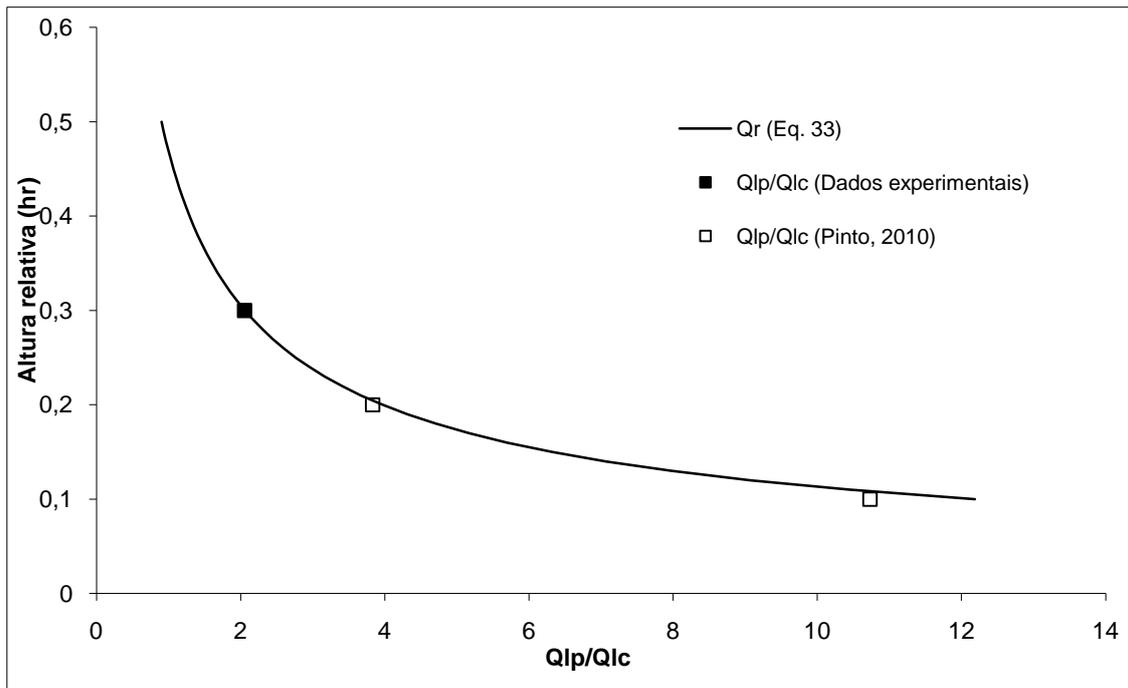


Figura 43 – Rácio do caudal do leito principal pelo leito de cheia

4.1.3. Distribuição transversal das tensões de arrastamento.

O perfil de tensões de arrastamento é apresentado juntamente com os perfis correspondentes às alturas relativas 0,1 e 0,2 retiradas de Pinto (2010) na Fig. 44. O aumento da altura de água foi acompanhado de um aumento das tensões de arrastamento em todo o canal, mas particularmente nos leitos de cheia onde se verifica uma maior diferença. Como já havia sido referido por Pinto (2010) e de acordo com os resultados de Yuen (1989), Atabay (2001) e Atabay *et al.* (2005) é possível identificar dois máximos relativos na zona das interfaces superiores e dois mínimos relativos na zona das interfaces inferiores.

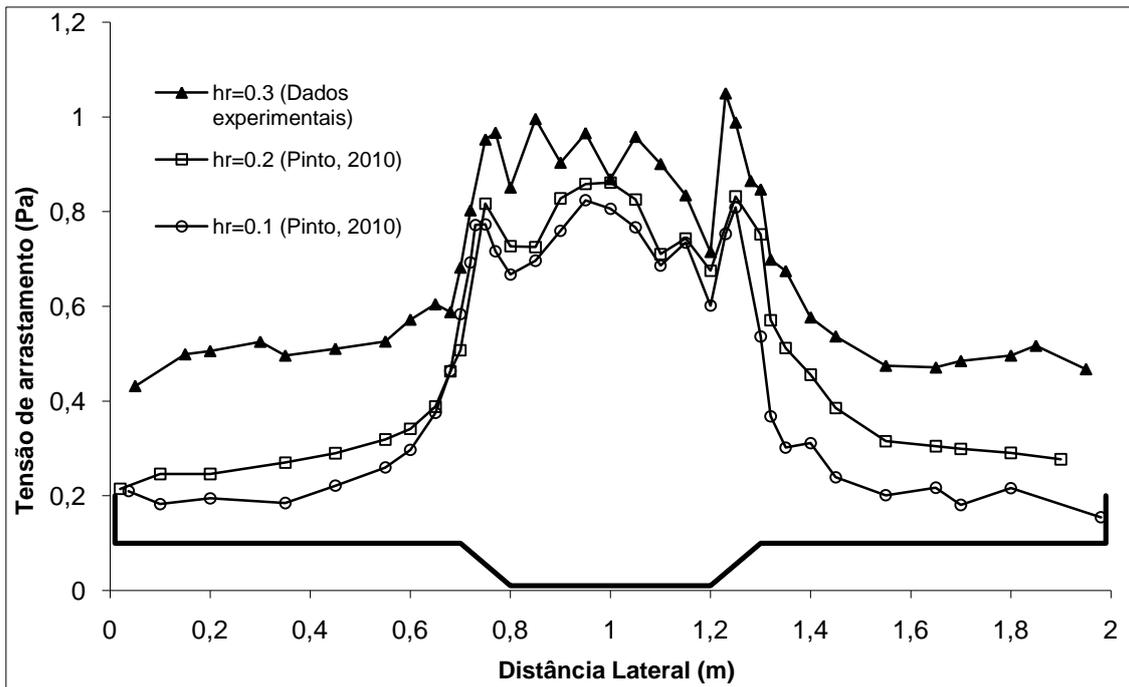


Figura 44 – Comparação dos perfis de tensões de arrastamento em secção transversal (X7500)

O aumento das tensões em todo o canal aquando do aumento da altura relativa é evidenciado na Fig. 45. Também se pode verificar que os valores obtidos experimentalmente das tensões tangenciais totais ou tensões de atrito totais (τ), se aproximam da curva teórica obtida através do método gravítico (e.g. Rowiński *et al.* 2005) que se baseia no balanço de forças num volume de controlo num escoamento uniforme, resultando;

$$\tau_0 = \rho g R S_0 \quad (34)$$

onde τ_0 é a tensão de arrastamento (Pa); ρ representa a massa volúmica da água (1000 kg/m³); g é aceleração gravítica (9,8 m/s²); R é o raio hidráulico (m) e S_0 o declive do canal (m/m). Saliente-se que usualmente o raio hidráulico (R) é substituído pela altura de escoamento, H (e.g. Cardoso, 1998). O método gravítico, apesar de expedito, não é muito

rigoroso, e como tal pode-se recorrer a métodos mais precisos, como são o método baseado no perfil logarítmico de velocidades ou o método de medição directa com tubos de Preston (cf. Rowiński *et al.* 2005).

Devido ao equipamento utilizado, não foi possível obter medições junto às paredes laterais dos leitos de cheia e foi considerado um valor constante ao longo do desenvolvimento daquelas paredes laterais igual ao valor registado mais próximo das paredes.

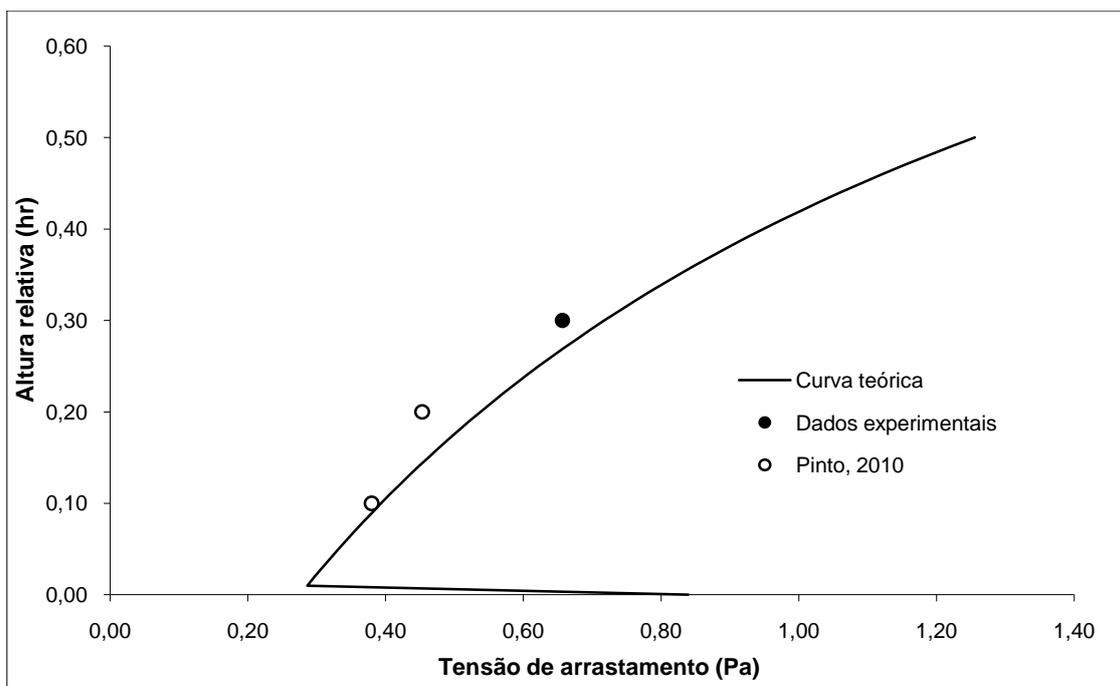


Figura 45 – Comparação dos valores obtidos experimentalmente para tensões totais de atrito em relação aos valores teóricos

Segundo Christodoulou (1992), em escoamentos uniformes o balanço de forças ao longo do leito principal conduz a

$$\tau_{xy} 2h + \tau_{LP} P_{LP} = \rho g S_0 S_{LP} \quad (35)$$

em que τ_{xy} representa as tensões de Reynolds na interface (Pa); h a altura de água nos leitos de cheia (m); τ_{LP} a tensão média de arrastamento no leito principal (Pa); P_{LP} o perímetro molhado no leito principal (m); ρ a massa volúmica (1000 kg/m³); g a aceleração gravítica (9,8 m/s²); S_0 o declive do canal, em m/m (na situação de regime uniforme é paralelo à linha de energia, que corresponde ao parâmetro S_f) e S_{LP} a área do leito principal (m²).

Nesta equação, o primeiro membro corresponde ao somatório de forças resistentes, enquanto que o segundo membro corresponde ao somatório das forças gravíticas.

O balanço de forças aplicado a cada leito de cheias resulta em

$$\tau_{LC} P_{LC} - \tau_{xy} h = \rho g S_0 S_{LC} \quad (36)$$

em que τ_{LC} representa a tensão de arrastamento média no leito de cheia; P_{LC} o perímetro molhado no leito cheia e S_{LC} a área do leito de cheia.

O balanço de força aplicado a toda a secção traduz-se por

$$\tau_{LP} P_{LP} + 2\tau_{LC} P_{LC} = \rho g S_0 S_{tot} \quad (37)$$

em que S_{tot} a área total da secção.

De notar que τ_{LP} e τ_{LC} foram obtidos integrando os perfis de tensão de arrastamento, tal como foi feito para os caudais.

Em percentagem a equação anterior pode escrever-se (Knight e Hamed, 1984)

$$\%SF_{LP} + 2\%SF_{LC} = 1 \quad (38)$$

na qual $\%SF_{LP}$ representa a percentagem das forças de atrito actuantes no leito principal e $\%SF_{LC}$ representa a percentagem de forças de atrito actuantes no leito de cheia.

De notar também, que esta expressão é igual ao valor unitário se as tensões forem obtidas pelo valor teórico.

No caso em estudo o valor é próximo da unidade porque tal como referido há pequenos erros experimentais. As percentagens podem ser calculadas da seguinte forma

$$\%SF_{LP} = \frac{\tau_{LP} P_{LP}}{\rho g S_0 S_{tot}} \quad (39)$$

$$\%SF_{LC} = \frac{\tau_{LC} P_{LC}}{\rho g S_0 S_{tot}} \quad (40)$$

Na Fig. 46, estão representados os valores obtidos experimentalmente em 3 diferentes alturas relativas ($hr = 0,1$ e $hr = 0,2$, retirados de Pinto, 2010) para a percentagem das forças de atrito actuantes nos leitos de cheia e a curva experimental proposta por Knight e Hamed (1984) com valores da mesma ordem de grandeza obtidos através da expressão

$$[\%(SF_{LC}^{esq} + SF_{LC}^{dir})] = 48(\alpha - 0,8)^{0,289} (2h_r)^{1/n} \quad (41)$$

Na qual

$$n = 0,75e^{0,38\alpha} \quad (42)$$

Existe contudo uma diferença na geometria do leito principal, que no presente estudo é trapezoidal enquanto a utilizada no trabalho de Knight e Hamed (1984) é rectangular, e por essa razão houve uma aproximação do parâmetro α , que representa o quociente entre metade da dimensão total do canal em secção transversal e metade da dimensão do leito principal. No entanto, os valores obtidos experimentalmente coincidem com a curva proposta por estes autores o que significa que com o aumento da altura de água a percentagem das forças de atrito presentes nos leitos de cheia também aumenta. O estudo de Knight e Hamed (1984) indica também que para canais bastante largos (parâmetro α elevado), para além da altura relativa tender para o valor unitário, essa percentagem de forças tende para os 100%.

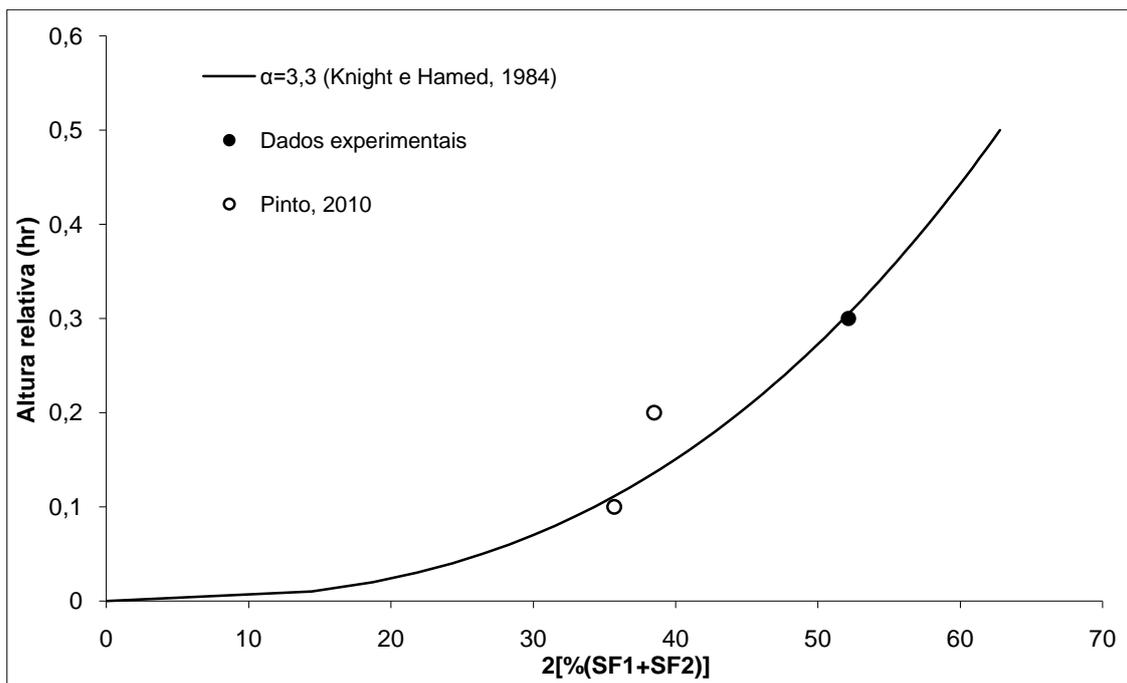


Figura 46 – Percentagem das forças de atrito actuaes nos leitos de cheia

Em Myers (1978) apresentou-se o conceito de “forças de atrito aparente” (ASF, na denominação inglesa “*apparent shear forces*”) que representa a transferência de quantidade de movimento originada pelo gradiente de velocidades que gera estruturas turbulentas (vórtices de eixo vertical) que retiram energia ao escoamento.

Geralmente, as forças de atrito aparentes são definidas nas verticais que separam os leitos de cheias do leito principal que correspondem em percentagem a

$$\%ASF_v = \frac{\tau_{xy} \cdot h}{\rho \cdot g \cdot S_0 \cdot S_{tot}} \quad (43)$$

Considerando novamente o parâmetro aproximado α , na Fig. 47 comparou-se os valores obtidos experimentalmente neste trabalho e em Pinto (2010) com a curva apresentada em Knight e Hamed (1984) obtida através da expressão

$$\%ASF_v = \frac{50}{(\alpha - 1)h_r + 1} - \frac{1}{2} \{100 - [\%(SF_{LC}^{esq} + SF_{LC}^{dir})]\} \quad (44)$$

É possível verificar alguma semelhança entre os valores obtidos neste trabalho e em Pinto (2010) com a curva proposta, o ligeiro desvio dos valores à curva está relacionado com a diferença das interfaces em ambos os trabalhos que influencia directamente as forças de atrito em cada leito e consequentemente as forças de atrito aparente.



Figura 47 – Variação das forças de atrito aparente verticais

De acordo com Knight e Hamed (1984), quando o valor das forças de atrito aparentes é positivo e apresenta valores entre 3-14%, existe um retardamento do escoamento no leito principal devido à interacção com o leito de cheia. Particularmente para alturas de água relativamente baixas, verificam-se maiores forças de atrito aparentes mas à medida que se aumenta o nível de água escoada verifica-se uma redução da interacção entre leitos, logo há uma redução do efeito dos vórtices de larga escala que provocam as transferências de massa e de quantidade de movimento.

4.1.4. Distribuição das tensões de Reynolds

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados obtidos através das sondas UVP que, como foi dito na secção 3.2.2, são equipamentos muito sensíveis e necessitam de ser manuseados com especial cuidado pois frequentemente os registos podem conduzir a resultados erróneos.

Para obter as tensões de Reynolds, foi necessário efectuar registos com duas sondas cruzadas (*flow mapping*) para registar os valores da velocidade no sentido do escoamento ou longitudinais e as velocidades no sentido perpendicular ao escoamento ou transversais. Do produto das flutuações das duas velocidades obtém-se a tensão de Reynolds em um ponto, como descrito no Cap. 2.1.3:

$$\tau_{xy} = -\rho \overline{(u'v')} \quad (45)$$

As tensões de Reynolds na secção X5000 são apresentadas na Fig. 48. Verifica-se que no leito de cheia as tensões são aproximadamente zero, mas com a aproximação ao leito principal vão aumentando até atingirem um máximo na zona da interface superior. Existe um desvio na zona da interface inferior entre as tensões obtidas a 40% e 60%, devido a pequenos erros de manuseamento do equipamento.

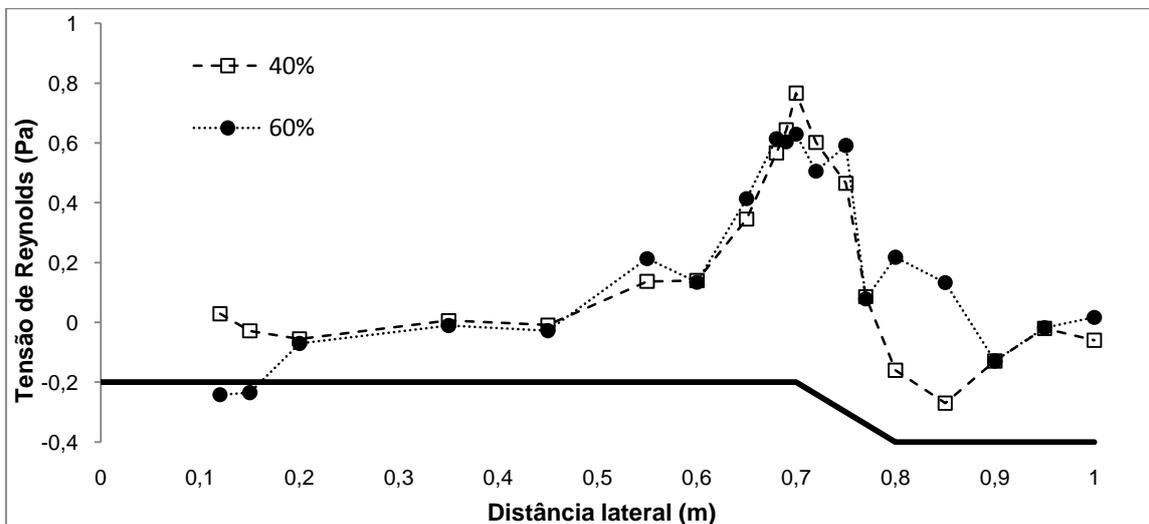


Figura 48 – Tensões de Reynolds (X5000)

Na zona da camada de mistura as tensões de Reynolds são bastante elevadas, da ordem de 0,8 Pa, aproximando-se dos valores da tensão de arrastamento (ver Fig. 44). Isto significa que a turbulência da camada de mistura apresenta magnitude semelhante à turbulência gerada pelo fundo. Fora da camada de mistura as tensões de Reynolds têm valor desprezável, indicando que o escoamento é essencialmente 2D.

4.2. Regime não uniforme

4.2.1. Desenvolvimento do escoamento ao longo do canal (+19%)

Após o estudo do Regime Uniforme para uma altura relativa de 0,3 (situação padrão), foram efectuadas 4 destabilizações no caudal (ver secção 3.3) para analisar e comparar as diferenças entre regime uniforme e regimes não uniformes. Contudo apenas uma das destabilizações foi medida ao longo do canal em quatro secções diferentes (X3000, X5000, X6000 e X7500) e por essa razão será esta que se deve comparar á situação padrão. Esta destabilização analisada teve um incremento de 19% (de forma a simplificar, esta combinação é identificada por “+19%”) do caudal nos leitos de cheia, passando os caudais a introduzir a ter os valores de 49,2 l/s no leito principal e 31,4 l/s nos leitos de cheia. Através das Figs. 49 e 50 é perceptível a existência de transferência de massa ao longo do canal através do aumento do caudal do leito principal e a diminuição do caudal do leito de cheia, ou seja, o escoamento tende para a situação de regime de uniforme.

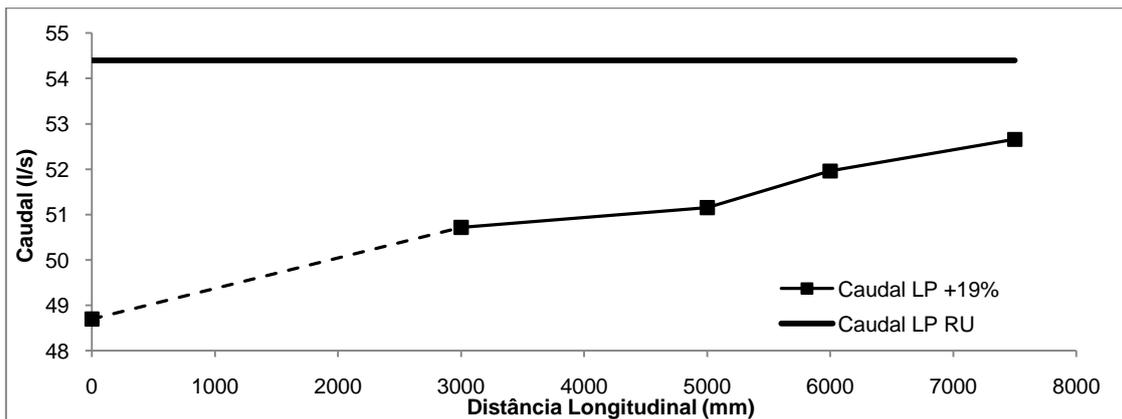


Figura 49 – Variação longitudinal dos caudais do leito principal

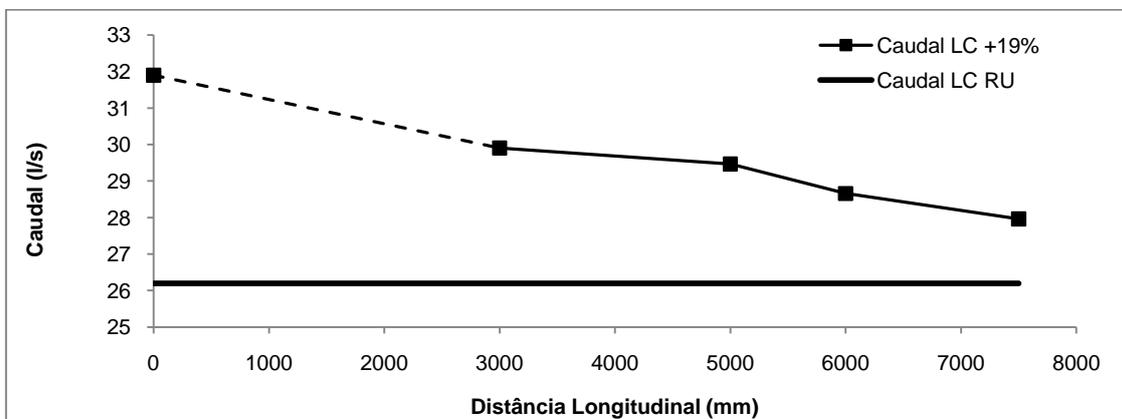


Figura 50 - Variação longitudinal dos caudais dos leitos de cheia

A distribuição dos caudais e as transferências de massa descritas anteriormente influenciam directamente o perfil transversal de velocidades. Tal como demonstra a Fig. 51, existem algumas semelhanças gerais com o perfil de velocidades obtido em Regime Uniforme (Fig. 33). No entanto, no leito principal verifica-se que existe um aumento das velocidades ao longo do canal com valores próximos entre a secção X6000 e X7500 indicando que já se encontram perto de um valor estável e nos leitos de cheia o perfil de velocidades tem um comportamento inverso, ou seja, a velocidade vai diminuindo de montante para jusante.

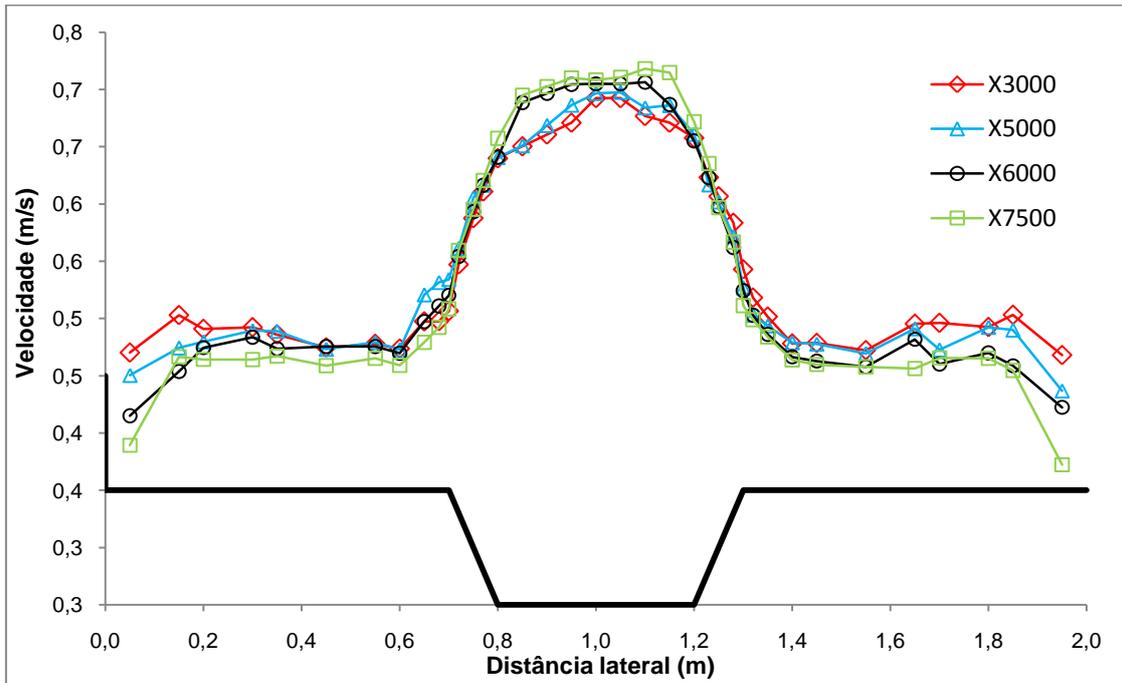


Figura 51 – Perfis de velocidades em secção transversal (+19%)

O incremento de caudal nos leitos de cheia faz com que a largura da camada de mistura diminua em relação ao escoamento em regime uniforme. Comparando a secção X7500, a camada de mistura em regime uniforme tinha uma largura de $\delta = 0,215$ m enquanto que na destabilização de +19% diminui para $\delta = 0,152$ m. Verifica-se também que ao longo do canal, com o sistema a convergir para uma situação de regime uniforme, a largura da camada de mistura vai aumentando como demonstra o Quadro 5.

Quadro 5 – Largura da camada de mistura nas várias secções (+19%)

X (m)	δ (m)
X3000	0,129
X5000	0,139
X6000	0,158
X7500	0,152

Nas Figs. 52 a 55 estão representadas as distribuições de velocidades médias no tempo ao longo das 4 secções estudadas. Comparando com as obtidas para RU (Figs. 35 a 37), nota-se que existe um aumento geral de velocidades nos leitos de cheia, devido ao aumento do caudal nestas zonas.

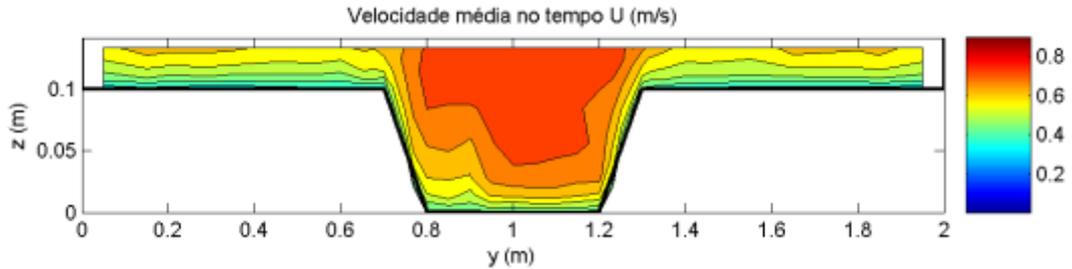


Figura 52 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X3000 (+19% $h_r = 0,3$)

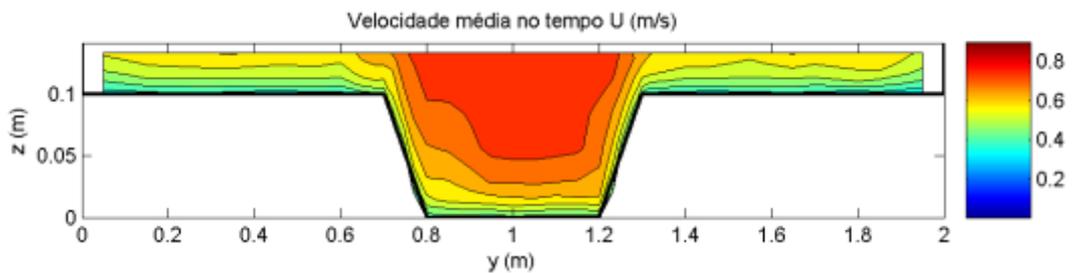


Figura 53 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X5000 (+19% $h_r = 0,3$)

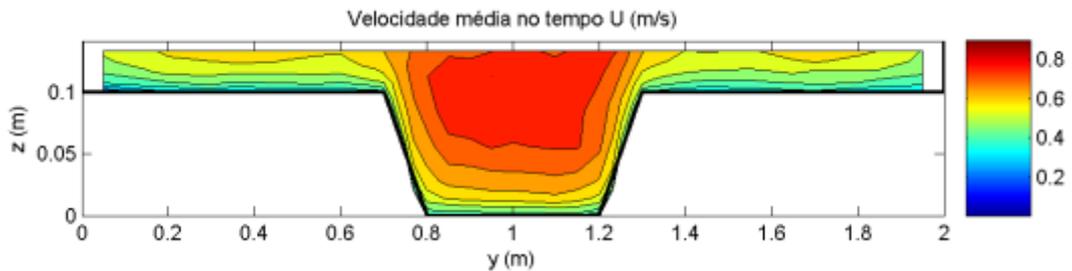


Figura 54 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X6000 (+19% $h_r = 0,3$)

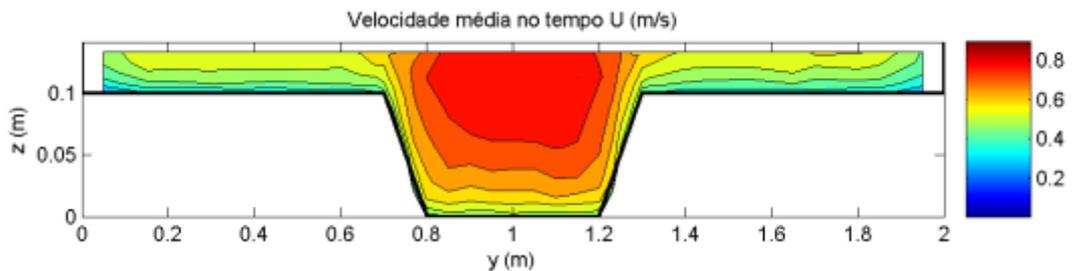


Figura 55 – Distribuição das velocidades médias no tempo na secção X7500 (+19% $h_r = 0,3$)

Da secção X3000 para a X5000 nota-se que existe uma diferença relativamente grande de velocidades no leito principal que pode ser justificada com a proximidade da primeira secção à alimentação do canal numa zona onde, devido à influência da alimentação separativa dos

leitos, os fenómenos de transferência de quantidade de movimento e de massa ainda se estão a desenvolver.

Nas secções mais a jusante as diferenças das velocidades não são tão acentuadas, significando que as transferências de quantidade de movimento entre ambos os leitos estão a diminuir e o sistema a convergir para um equilíbrio.

As tensões de arrastamento para RNU (Fig. 56) apresentam algumas diferenças em relação ao RU (Fig. 44), pois os valores máximos de τ_0 deixam de estar situados na zona da interface para passarem a ocorrer no centro do LP. Ainda assim, na zona da interface continuam a existir máximos e mínimo relativos.

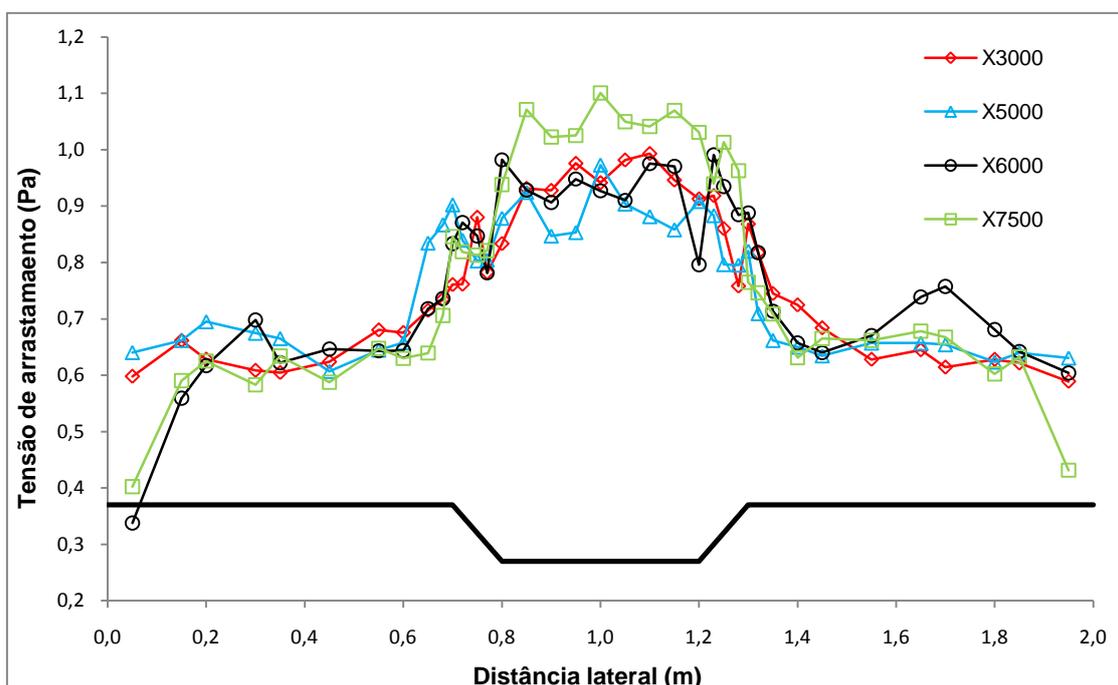


Figura 56 – Perfis das tensões de arrastamento em secção transversal (+19%)

4.2.2. Distribuição transversal das tensões de arrastamento

Para a comparação das tensões de arrastamento entre a situação padrão (RU) e o Regime não Uniforme usou-se apenas a destabilização de +19% nos leitos de cheia.

Na Fig. 57 estão representados os perfis das tensões de arrastamento dos dois regimes na secção X7500 onde se verifica que o aumento de caudal nos leitos de cheia foi acompanhado de um aumento de tensões nesta zona e uma diminuição no leito principal. Apesar de na situação padrão existirem dois “picos” coincidentes com as interfaces superiores e dois mínimos relativos com as interfaces inferiores, em Regime não uniforme este fenómeno verifica-se apenas nas interfaces do lado esquerdo. Isto pode estar relacionado com o desequilíbrio entre a alimentação dos leitos de cheia, pequenos erros de calibração ou de rigor na medição.

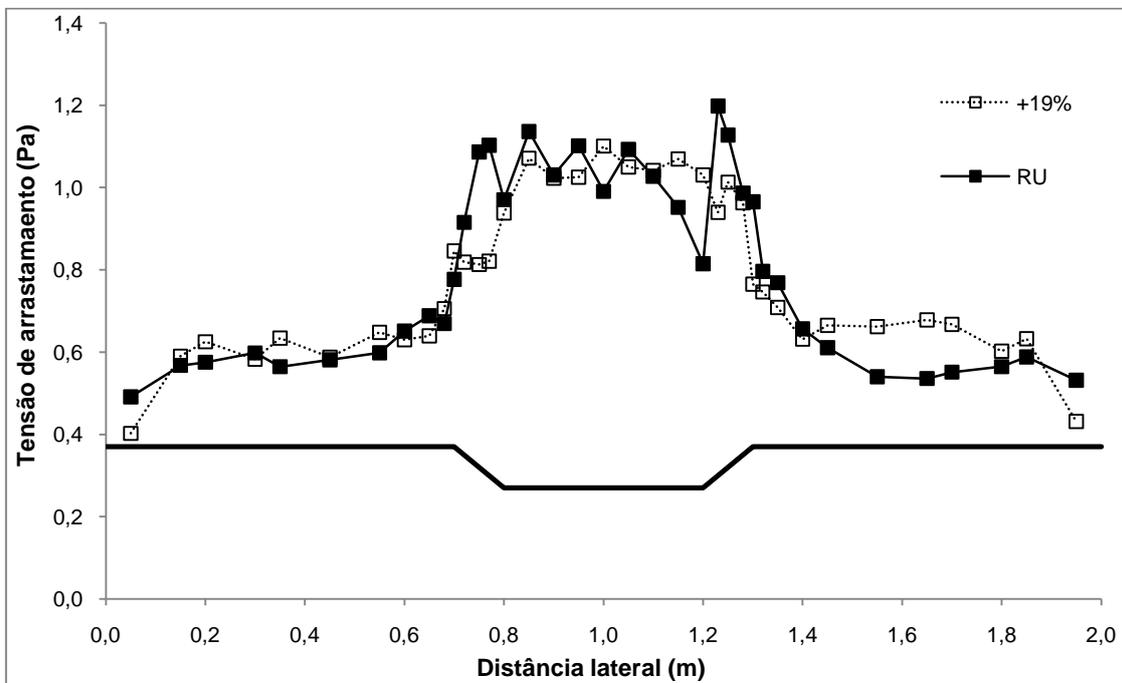


Figura 57 – Comparação dos perfis das tensões de arrastamento em secção transversal (X7500)

Para o estudo das tensões desenvolvidas em Regime não Uniforme, como já havia sido feito em Pinto (2010) foram utilizadas praticamente as mesmas expressões da situação padrão apenas alterando a expressão que traduz a conservação da quantidade de movimento que de acordo com Chow (1959) apresenta a seguinte forma;

$$\frac{d}{dX}(SU^2) + gS \frac{dH}{dX} = gS(S_0 - S_f) \quad (46)$$

A diferença consiste na alteração no parâmetro S_0 que agora teve de ser substituído por S_f (inclinação média da linha de energia). Foram calculados dois parâmetros S_f (um para cada leito).

Quadro 6 – Valores da inclinação média da linha de energia

S_f (LP)	S_f (LC)
0,001265	0,001327

Para a obtenção destes valores foi necessário estimar as derivadas presentes na Eq. (46), entre as secções X6000 e X7500. Evidentemente, a distância entre as duas secções devia ser o menor possível mas os valores obtidos são pequenos e as variações produzidas são pouco significativas.

Na Fig. 58, estão representadas as tensões totais de atrito em Regime Uniforme e Regime não Uniforme. Conclui-se que há um aumento das tensões totais de atrito, e como tal verifica-se uma aproximação à curva teórica dada pela expressão (35) apresentada no capítulo anterior.

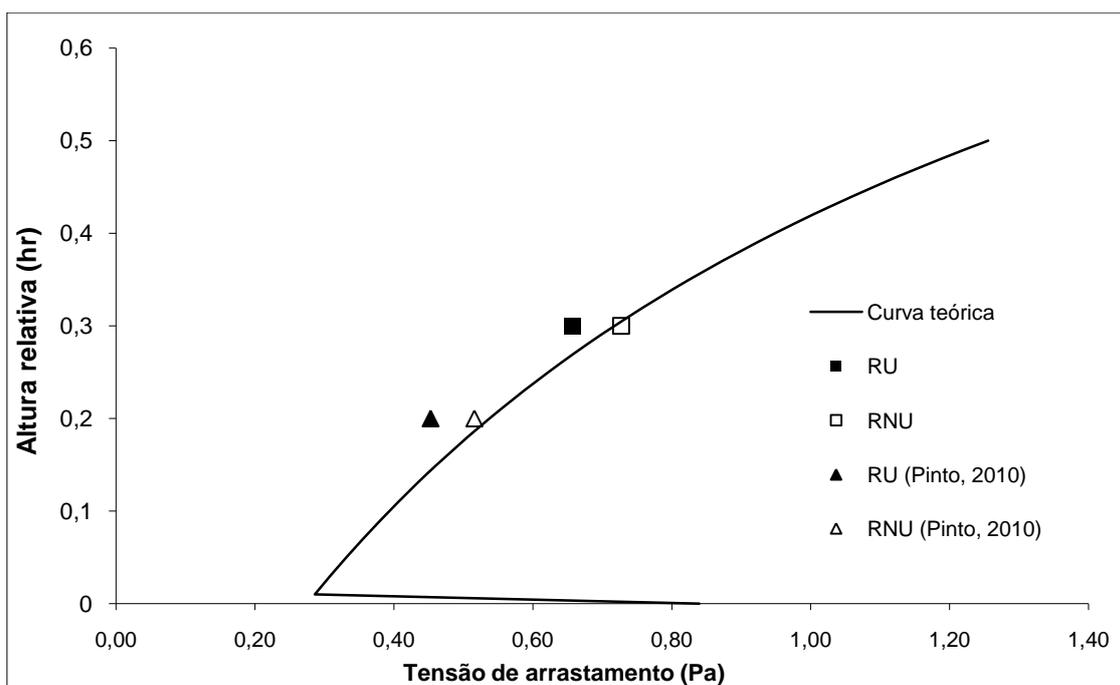


Figura 58 – Comparação dos valores obtidos experimentalmente para tensões totais de atrito com valores teóricos

Observando a Fig. 59, é possível verificar um aumento das percentagens das forças de atrito nos leitos de cheia para a destabilização de caudais de +19%, enquanto em Pinto (2010) para uma altura relativa de 0,2, os valores se aproximam da recta no presente estudo afastam-se dos valores dados pela expressão (42).

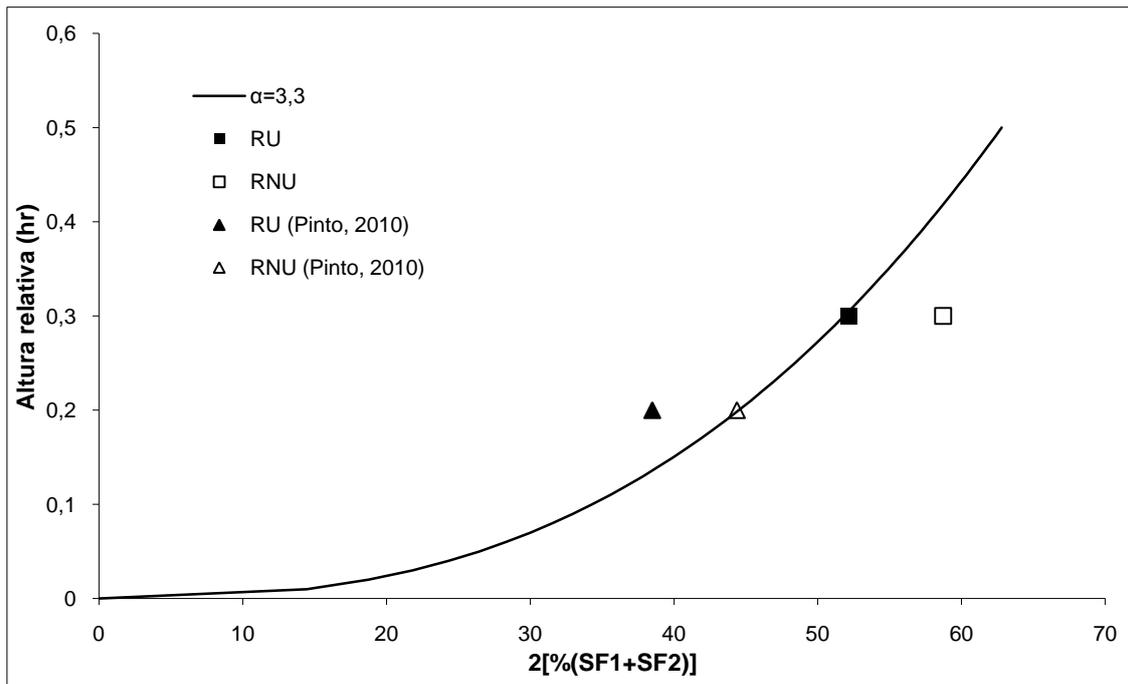


Figura 59 – Percentagem das forças de atrito actuantes nos leitos de cheia

Na Fig. 60 verifica-se que para a situação de regime não uniforme as forças de atrito aparente verticais sofrem um aumento, porque com o incremento de caudal nos leitos de cheia, promove-se a transferência de quantidade de movimento entre leitos com respectivo aumento das forças tangenciais existentes nas interfaces.

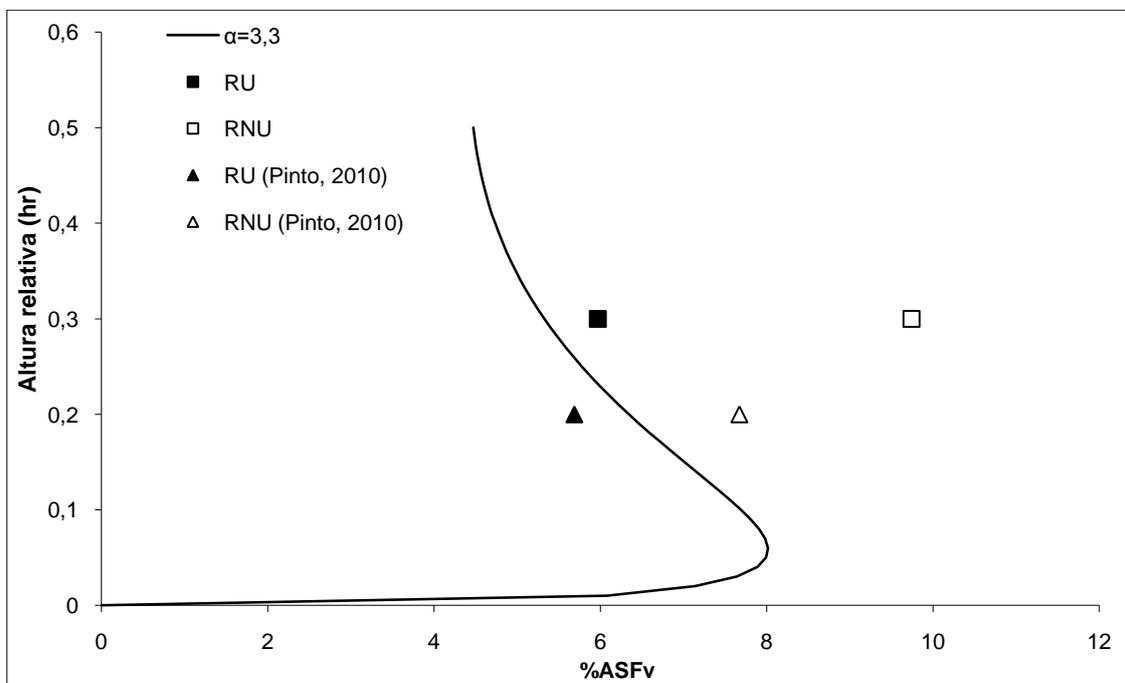


Figura 60 – Variação das forças de atrito aparente verticais

4.2.3. Outras destabilizações

Tendo em conta o que foi feito no capítulo anterior, também para o Regime não Uniforme foram comparados os resultados obtidos experimentalmente com os dados de outros autores, nomeadamente com os resultados de Myers *et al.* (2001). Contudo, apesar de até aqui só ter sido apresentada a destabilização de +19% nos caudais de cheia, por ter sido a única destabilização que foi estudada ao longo do canal, nestes gráficos serão também inseridos os resultados para as destabilizações de +38%, +53% e -19% registados a meio do canal (X5000). Na Fig. 61 estão representados os perfis de velocidade correspondentes às diversas destabilizações. Comparando com a situação padrão (RU) nota-se que a velocidade aumenta com o aumento da percentagem de caudal nos leitos de cheia e diminui no leito principal, como já havia sido referido anteriormente. A destabilização em que foi retirado 19% do caudal do LC é a quem tem a menor velocidade nesta zona, mas é a que tem a maior velocidade no LP. O inverso é verificado na destabilização +53%, onde as velocidades nos LC são ligeiramente superiores às do LP.

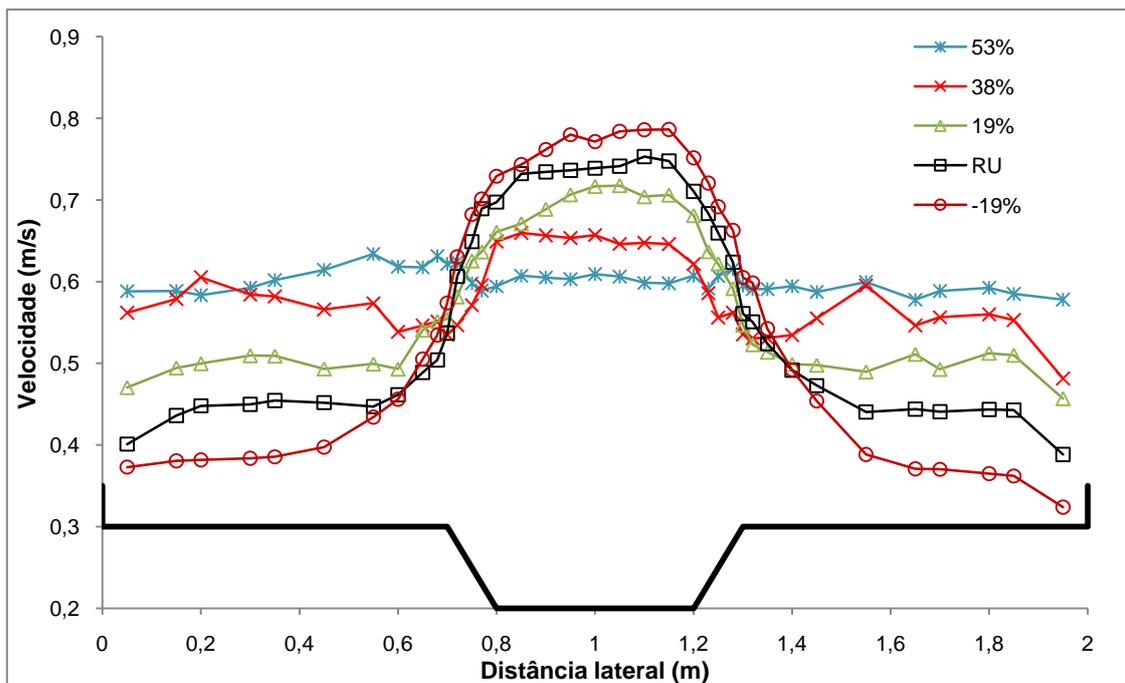


Figura 61 – Perfis de velocidades para várias destabilizações em secção transversal (X5000)

Também os registos efectuados com as sondas UVP efectuados a 40% e a 60% da altura de água do LC confirmam que, para a destabilização +53%, as velocidades são maiores nos LC do que no LP. Nas Figs. 62 e 63 nota-se que existe mesmo um ponto de inflexão, onde as velocidades invertem, coincidente com a interface superior.

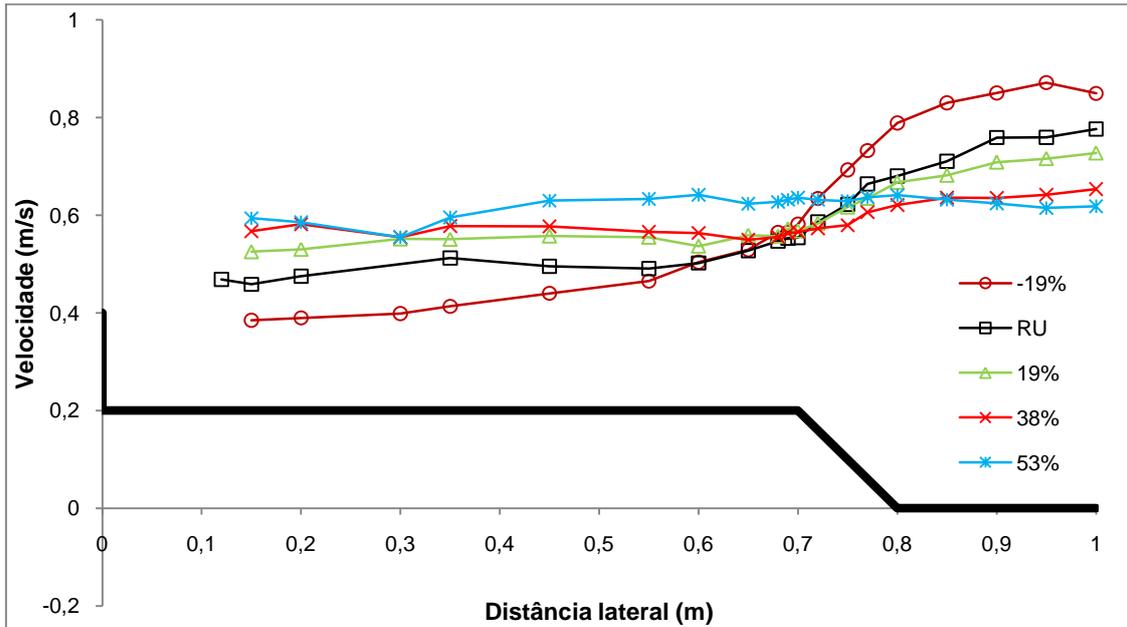


Figura 62 – Perfis de velocidades para várias destabilizações em secção transversal obtidas a 40% da altura de água do LC (X5000)

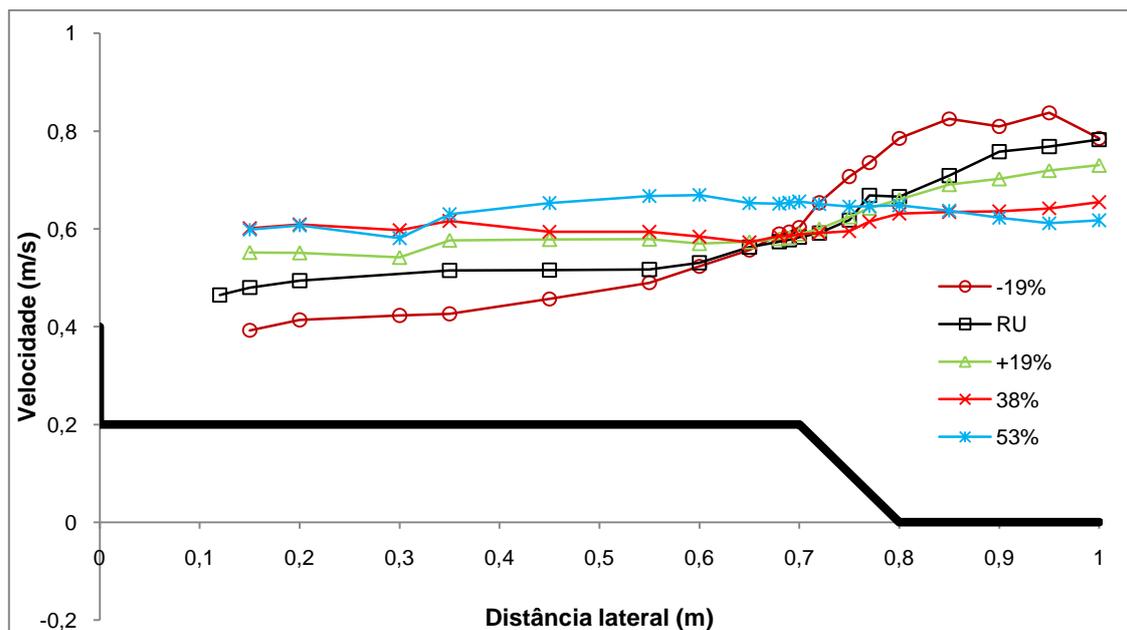


Figura 63 – Perfis de velocidades para várias destabilizações em secção transversal obtidas a 60% da altura de água do LC (X5000)

Nas Fig. 64 a 68 apresentam-se as distribuições de velocidades médias na secção X5000 das várias destabilizações. É possível verificar que na destabilização -19% as velocidades nos leitos de cheia são as mais baixas e vão aumentando com o incremento de água, sendo as mais elevadas as correspondentes à destabilização de +53%. Em relação ao leito principal, como demonstrado através dos perfis de velocidade apresentados anteriormente, conclui-se que a velocidade vai diminuindo com o aumento da percentagem de água nos leitos de cheia.

A comparação entre as figuras correspondentes às destabilizações de -19% e +53% demonstram isso mesmo, ou seja, no primeiro caso a diferença de velocidades é mais acentuada nas zonas das interfaces enquanto na destabilização de +53% a transição é feita de uma forma mais suave.

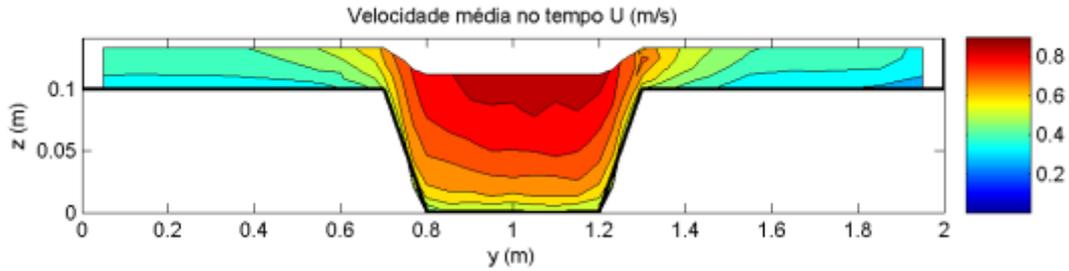


Figura 64 – Distribuição de velocidades médias no tempo (-19% $h_r = 0,3$)

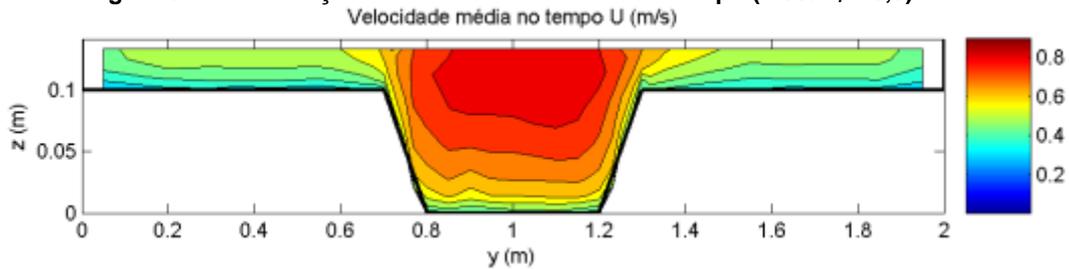


Figura 65 – Distribuição de velocidades médias no tempo (RU $h_r = 0,3$)

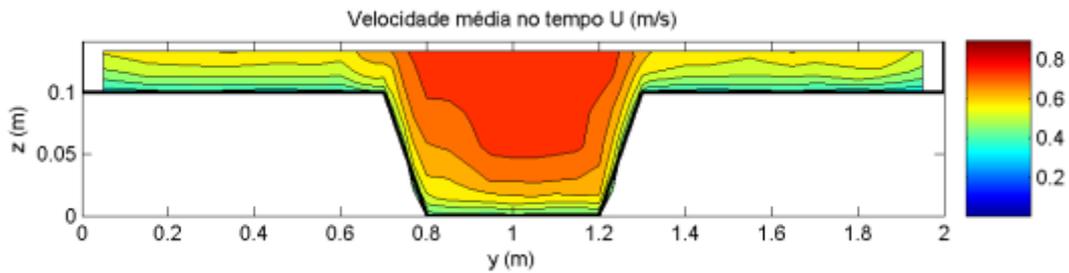


Figura 66 – Distribuição de velocidades médias no tempo (+19% $h_r = 0,3$)

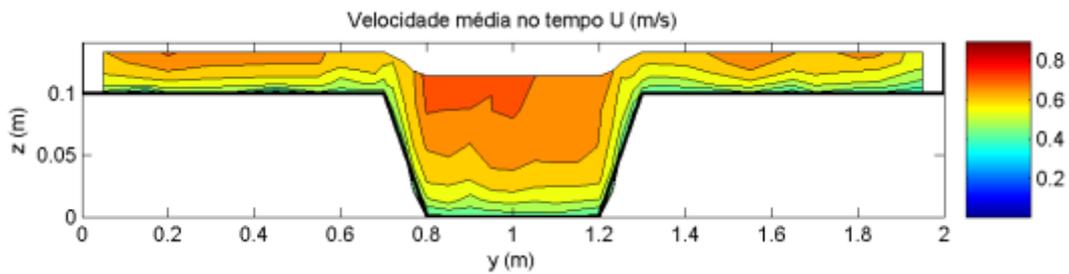


Figura 67 – Distribuição de velocidades médias no tempo (+38% $h_r = 0,3$)

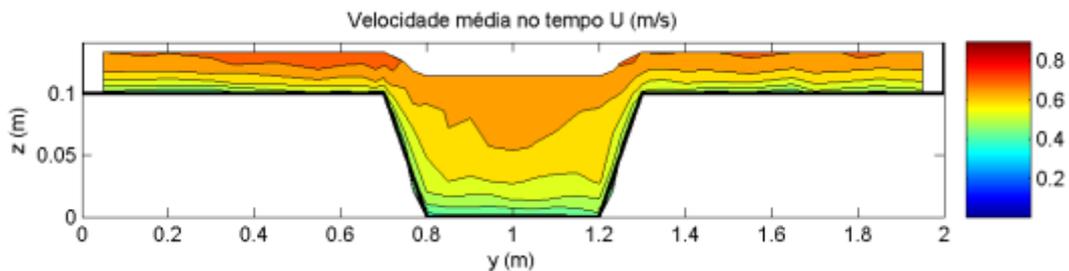


Figura 68 – Distribuição de velocidades médias no tempo (+53% $h_r = 0,3$)

De acordo com a Fig. 69 é possível verificar que estes incrementos de velocidade são directamente proporcionais ao aumento de caudal, e que existe um afastamento entre as velocidades dos LC e LP quando se retira 19% do caudal dos leitos de cheia e um aproximar de velocidades de ambos os leitos, até quase coincidirem (destabilização +53%), á medida que se aumenta a quantidade de água nos leitos de cheia.

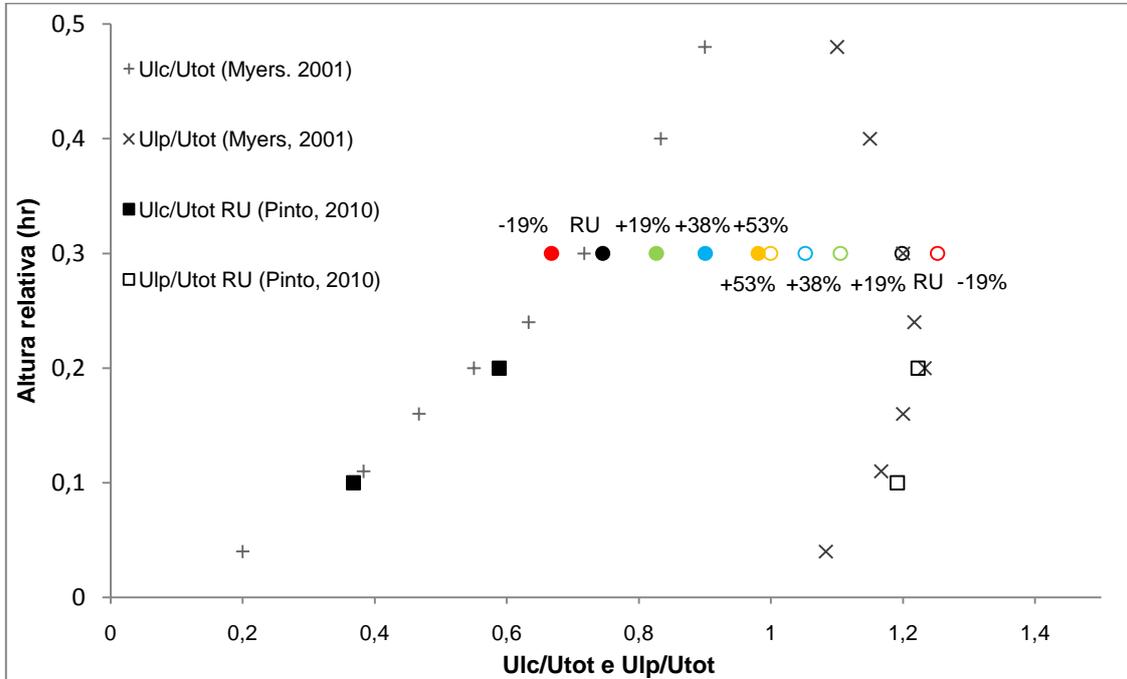


Figura 69 – Rácio das velocidades médias de LP e LC pela velocidade média da secção total

Na Fig. 70, verifica-se que os rácios da velocidade do leito de cheia pelo leito principal se afastam dos valores teóricos em todas as destabilizações. Quando se retira 19% do caudal dos leitos de cheia o rácio aumenta afastando-se para a direita da curva teórica enquanto o incremento de caudal neste leito para as outras destabilizações conduz os valores do rácio para a esquerda da curva para valores inferiores aos propostos, particularmente na destabilização +53% o rácio está perto da unidade o que significa que a velocidade é quase igual em ambos os leitos.

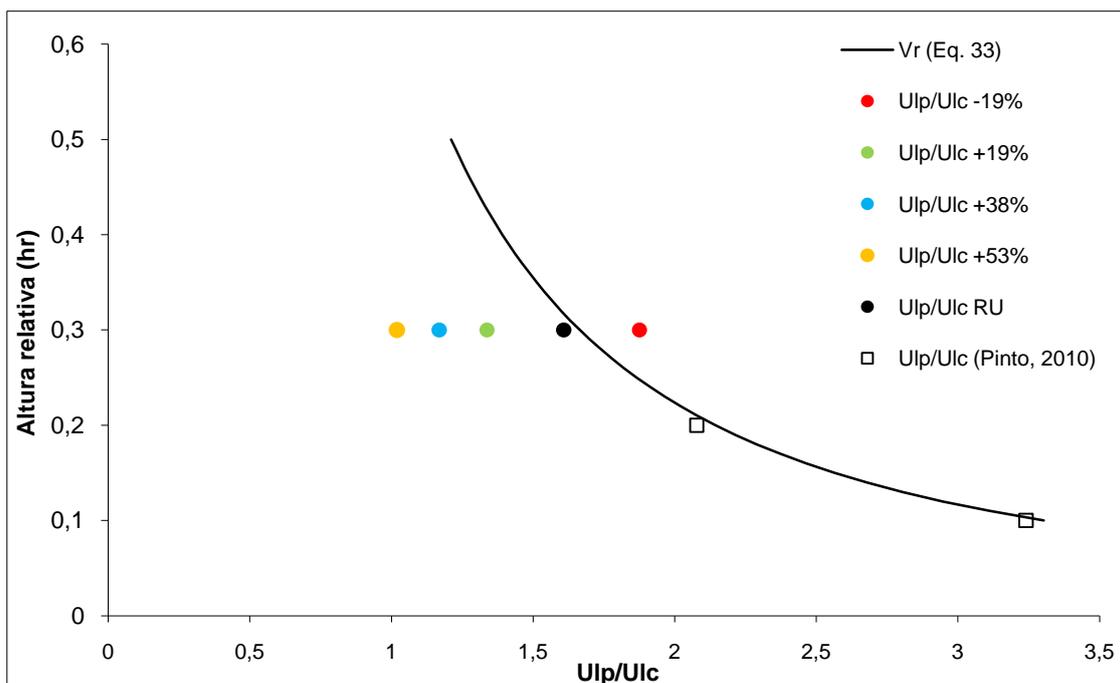


Figura 70 – Rácio da velocidade média no leito principal pela velocidade média do leito de cheia

Em relação ao caudal escoado, o rácio dos caudais dos dois leitos pelo caudal total tem um comportamento semelhante ao comportamento dos rácios das velocidades, na Fig. 71 é possível verificar uma diminuição do rácio nos leitos principais e o correspondente aumento nos leitos de cheia excepto na destabilização -19% que tem o comportamento inverso.

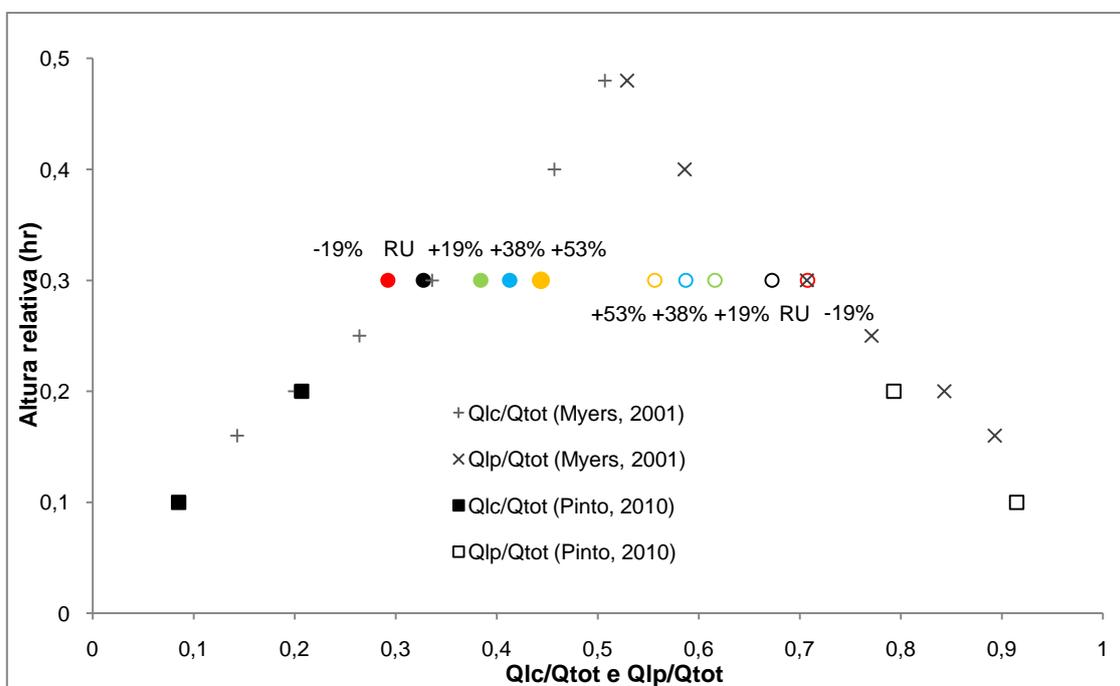


Figura 71 – Rácio dos caudais nos leitos de cheia e principal pelo caudal total

Quando se compara os resultados experimentais do rácio do caudal do leito principal pelo caudal do leito de cheia (Fig. 72) nota-se que estes se afastam da curva teórica quando há um aumento o caudal do LC, diminuindo o seu valor quanto maior for a destabilização.

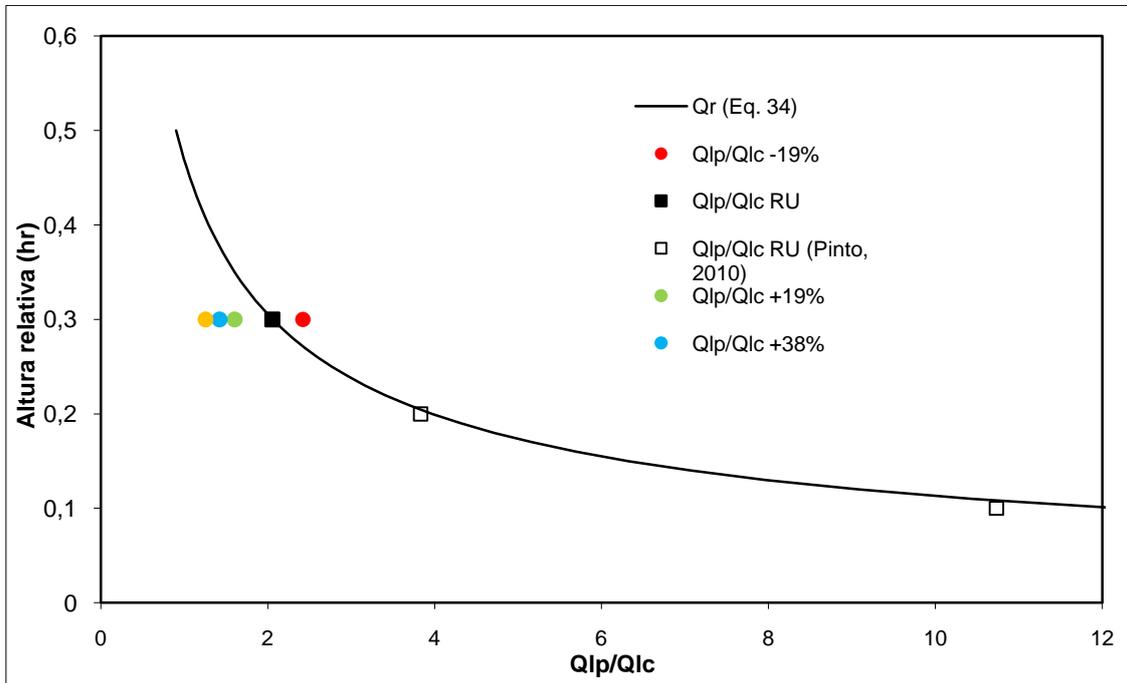


Figura 72 – Rácio do caudal do leito principal pelo caudal do leito de cheia

4.2.4. Distribuição das tensões de Reynolds

4.2.4.1. Várias destabilizações

As tensões de Reynolds obtidas na secção X5000 para as várias destabilizações, são apresentadas nas Figs. 73 e 74, respectivamente, para as alturas correspondentes a 40 e 60% da altura de água nos leitos de cheia.

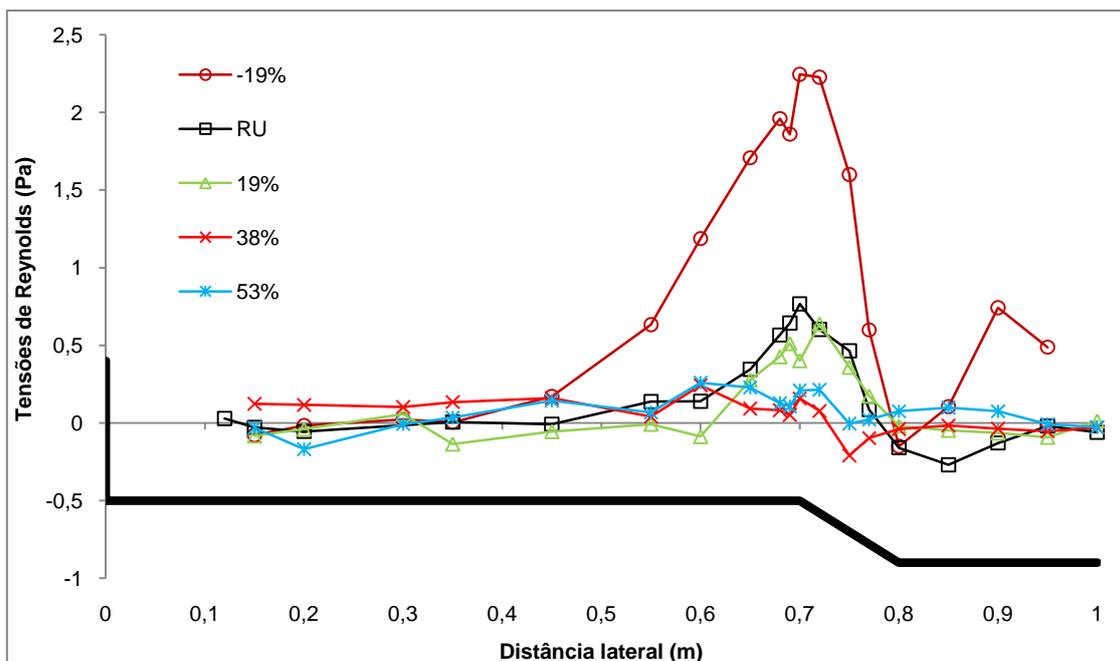


Figura 73 – Tensões de Reynolds a 40% para várias destabilizações (X5000)

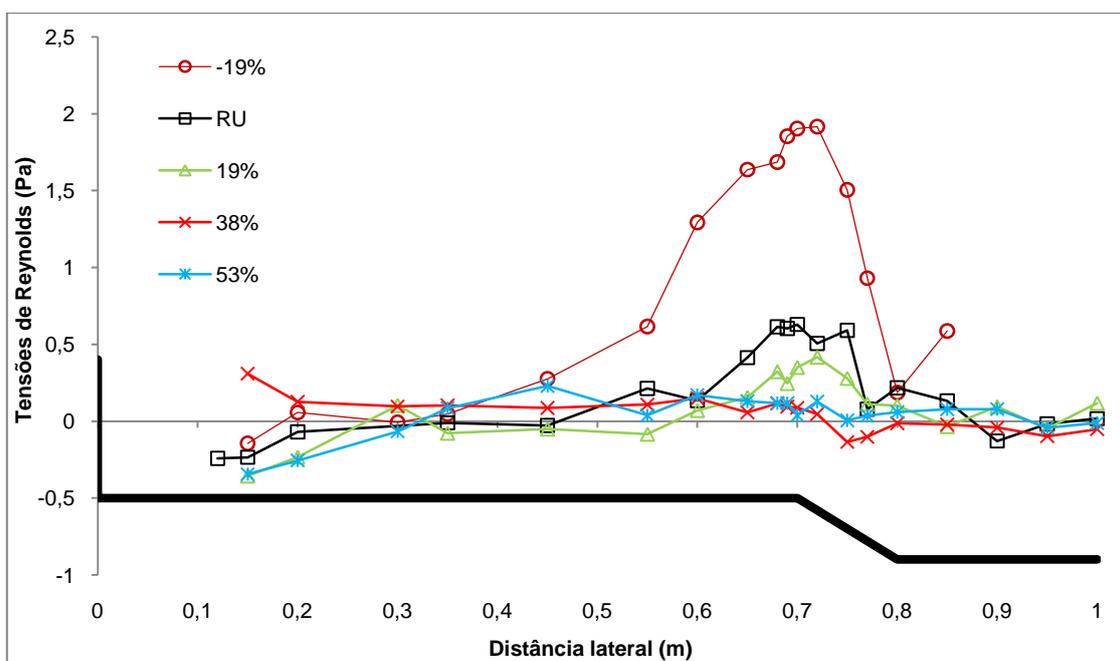


Figura 74 – Tensões de Reynolds a 60% para várias destabilizações (X5000)

Conforme se pode verificar nas figuras anteriores todas as destabilizações têm um máximo relativo próximo da interface superior e valores das tensões mínimos na interface inferior. Verifica-se que os valores das tensões mais elevados na interface superior correspondem à destabilização de -19%, seguido da situação padrão e da destabilização +19%, ou seja, ao diminuir a percentagem de caudal nos LC e conseqüentemente a aumentar a diferença de velocidades entre os leitos, as tensões de Reynolds aumentam, particularmente visível quando comparando o regime uniforme com a transferência de -19% do caudal.

Estes resultados mostram que a transferência de massa do LP para o LC, que ocorre para RNU -19%, altera não só o valor máximo das tensões de Reynolds como também provoca um alargamento da camada de mistura na direcção do LC.

Comparando os resultados de RNU -19%, RNU +19% e RU torna-se evidente que a subalimentação dos LC, que gera transferência de massa do LP para os LC, tem um impacto muito maior na turbulência do que a sobrealimentação dos LC. Este facto deve estar relacionado com a maior facilidade das estruturas turbulentas de larga escala aumentarem de dimensão na direcção dos LC, onde as velocidades são menores, do que na direcção do LP, onde as velocidades maiores funcionam como bloqueio ao aumento da camada de mistura.

4.2.4.2. Evolução longitudinal +19%

Uma vez que as tensões de Reynolds têm os valores mais elevados na zona da interface superior, foi feita uma análise longitudinal apenas na zona da interface para estudar a evolução destas tensões ao longo do canal. Os resultados para a destabilização +19% são apresentados nas Figs. 75 e 76.

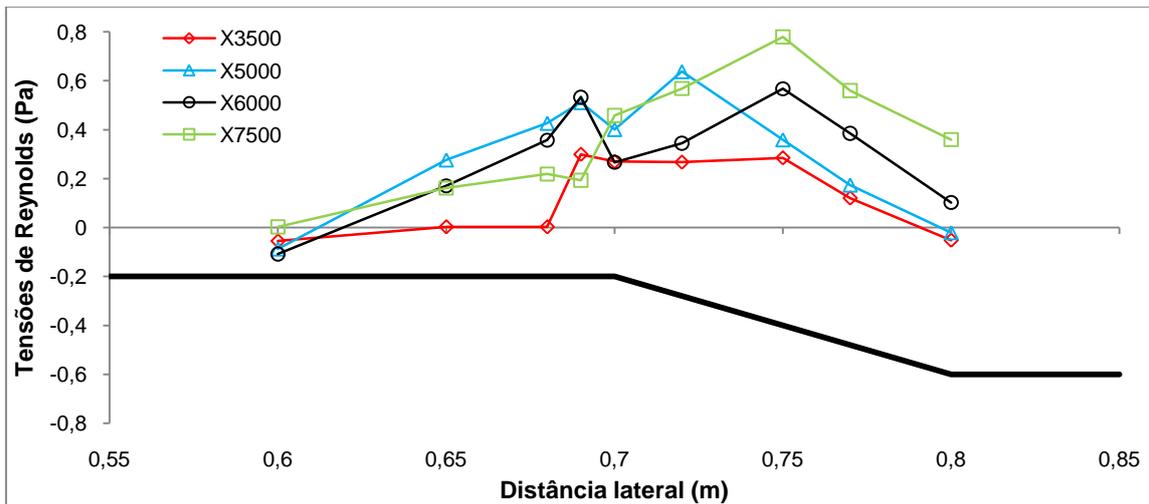


Figura 75 – Evolução Longitudinal das tensões de Reynolds registadas a 40% (+19%)

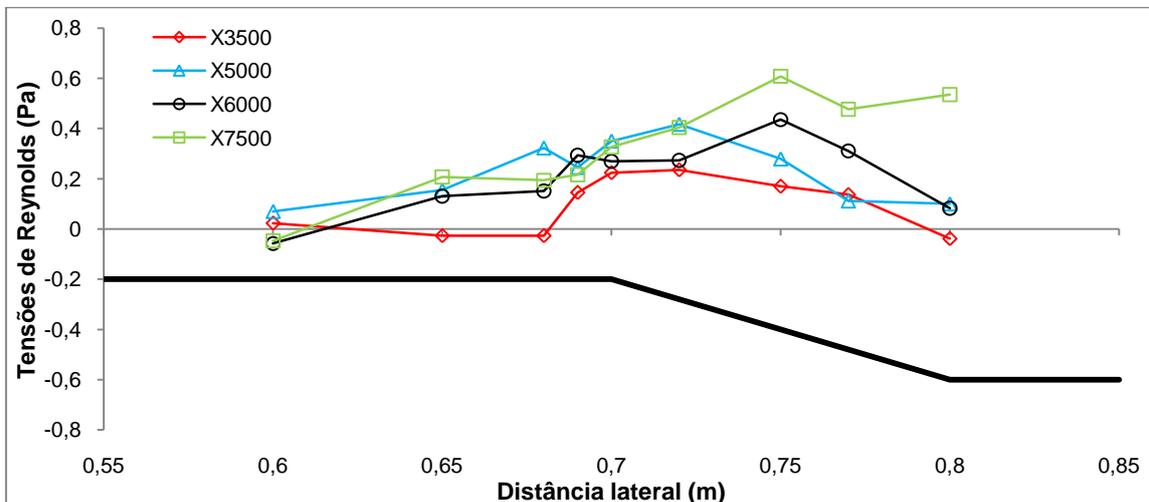


Figura 76 – Evolução Longitudinal das tensões de Reynolds registadas a 60% (+19%)

É possível observar que as tensões de Reynolds aumentam ao longo do canal, pois a diferença de velocidade também aumenta ao longo do canal para esta destabilização (+19%). Nota-se também que o valor máximo da tensão se vai desviando para a direita, em direcção ao canal principal, ao longo do canal. Esta tendência está relacionada com as transferências de massa de água do leito de cheia para o leito principal serem maiores no início do canal e na secção mais a jusante já haver um equilíbrio entre quantidade de água em ambos os leitos.

4.2.4.3. Evolução longitudinal -19%

Como foi demonstrado anteriormente, a destabilização de -19% apresentou os maiores valores de tensões de Reynolds quando comparando com as outras destabilizações analisadas no presente estudo. Apresentam-se nas Figs. 77 e 78 as tensões de Reynolds obtidas nas 4 secções estudadas ao longo do canal, registadas a 40% e 60% da altura de água nos leitos de cheia.

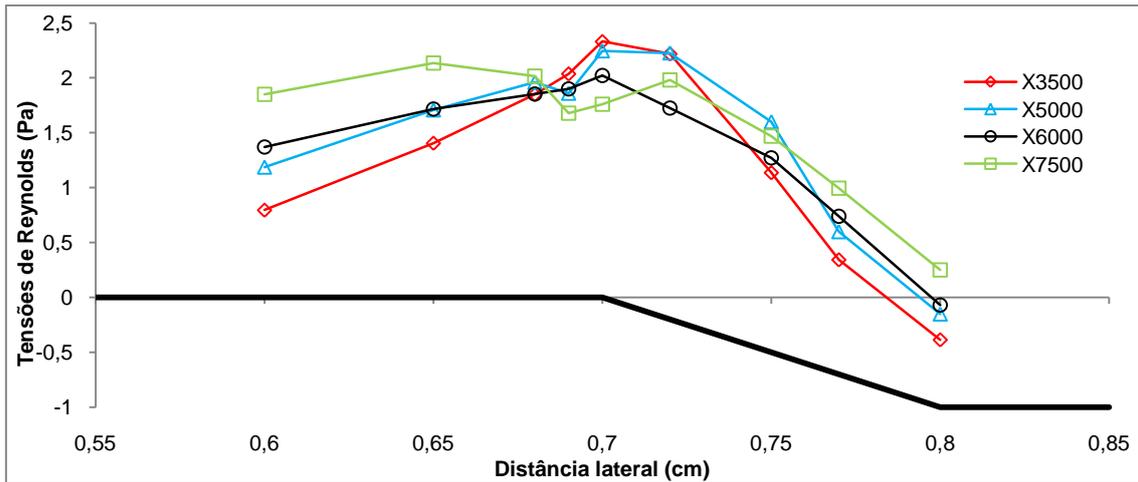


Figura 77 – Evolução Longitudinal das tensões de Reynolds registadas a 40% (-19%)

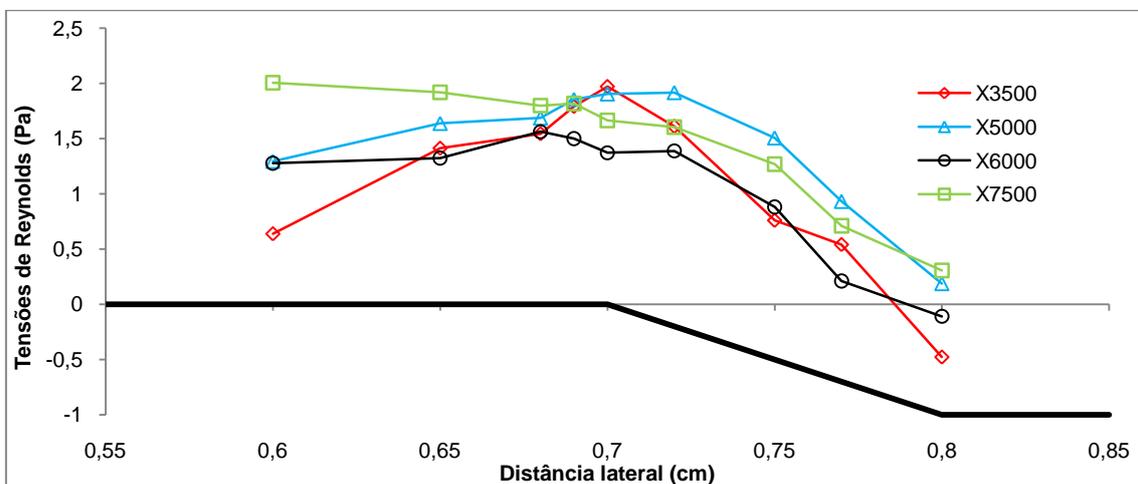


Figura 78 – Evolução Longitudinal das tensões de Reynolds registadas a 60% (+19%)

Também nestas figuras se verifica que os valores da tensão são superiores na zona da interface superior. Os valores mais elevados nesta zona são os obtidos na secção mais a montante e ao longo do canal, devido à aproximação de velocidades, *i.e.* ao menor gradiente dU/dY , as tensões vão diminuindo.

5. Conclusões e propostas para futuros estudos

A influência do regime uniforme e de diversos regimes não uniformes em escoamentos em canais com secção composta foi investigada através de ensaios experimentais com dois métodos de medição de velocidades do escoamento. Após a recolha e tratamento dos dados fornecidos por estes métodos, foi possível apresentar perfis de velocidades longitudinais médias, de velocidades transversais, de tensões de arrastamento e de tensões de Reynolds para melhorar a caracterização dos escoamentos em canais de secção composta e aumentar o conhecimento dos fenómenos inerentes a este tipo de escoamento.

O procedimento para a obtenção do regime uniforme foi pensado e executado de forma a não se verificarem transferências de massa relevantes ao longo do canal. Com base nos dados recolhidos nestas condições verificou-se que nas secções estudadas a jusante (X6000 e X7500) existe uma semelhança de comportamentos e uma proximidade de valores, tanto nos perfis de velocidade como nos perfis de tensões de arrastamento e de Reynolds. Por haver uma estagnação de fenómenos entre estas secções, as comparações definidas na base deste estudo tiveram como referência os dados recolhidos na secção X7500.

Após a plena caracterização do escoamento em regime uniforme, efectuaram-se várias destabilizações com a transferência de caudais do leito principal para o leito de cheia. Foram efectuadas 4 destabilizações (-19%, +19%, +38% e +53%) e compararam-se os resultados obtidos com os valores do regime uniforme para compreender a influência das transferências de massa. Através desta comparação, observou-se que:

- As alturas do escoamento variam na direcção longitudinal ao longo das secções do canal.
- Existe também uma tendência para estagnação dos fenómenos na direcção longitudinal do escoamento (níveis de água, velocidades e tensões), ou seja o escoamento procura atingir a situação de equilíbrio (*i.e.* regime uniforme).
- No caso da sobrealimentação dos LC, a largura da camada de mistura diminui relativamente à situação de regime uniforme, devido à existência de transferência de massa (escoamento transversal) na direcção do LP que pode estirar os vórtices de larga escala. No caso da subalimentação dos LC, a largura da camada de mistura aumenta no sentido dos LC, em consequência da transferência de massa nessa direcção.
- Em relação às tensões de arrastamento ou de atrito na totalidade da secção transversal do canal, verifica-se um ligeiro aumento das mesmas, em relação à situação de regime uniforme.

- Denota-se um aumento das tensões de atrito aparente verticais nas interfaces com o aumento da sobrealimentação dos LC. Porém as tensões de Reynolds diminuem, consequência do aumento da transferência de massa entre leitos e que afecta as estruturas turbulentas da camada de mistura.
- Com o aumento da percentagem de caudal nos leitos de cheia, a diferença entre as velocidades do leito principal e leito de cheia diminui. Consequentemente, o gradiente dU/dY diminui, o que também pode ajudar a explicar a diminuição das tensões de Reynolds.

È necessário realçar que neste tipo de estudos a qualidade dos resultados obtidos é particularmente sensível a possíveis negligências durante a campanha experimental. Como tal, para além de todas as repetições realizadas durante os ensaios, este estudo encontra-se ainda em desenvolvimento, para verificar determinadas tendências de valores e confirmação de resultados, com constantes tentativas de melhoria das instalações experimentais, calibrações de equipamentos e posicionamentos das medições, sempre com o intuito de uma optimização dos resultados que possam vir a ser apresentados. Assim sendo, na linha do presente estudo seria recomendável:

- Apresentar resultados de estudos para mais alturas relativas.
- Verificar mais evoluções longitudinais para diferentes tipos de destabilização (variação das percentagens de incremento de caudais a montante).
- Estudo mais aprofundado sobre os efeitos das transferências de massa entre leitos nas estruturas turbulentas da camada de mistura.
- Estudar a ocupação dos leitos de cheia com respectiva alteração da rugosidade.

6. Bibliografia

- Atabay, S. (2001). "Sediment transport in two stage channels". Tese de Doutoramento, The University of Birmingham School of Civil Engineering, Reino Unido.
- Atabay, S., Knight, D. W. e Seçkin, G. (2005). "Effects of overbank flow on fluvial sediment transport rates". Water Management, Proceedings of the Institution of Civil Engineers.
- Boiten, W. (2000). "Hidrometry". Rotterdam, Netherlands.
- Bousmar, D. e Zech, Y. (1999). "Momentum transfer for practical flow computation in compound channels." Journal of Hydraulic Engineering, 125(7), pp. 696-706.
- Bousmar, D., Rivière, N., Proust, S., Paquier, A., Morel, R. e Zech, Y. (2005). "Upstream Discharge Distribution in Compound-Channel Flumes". Journal of Hydraulic Engineering, 131(5), pp. 408-412.
- Cardoso, A. H. (1998). "Hidráulica Fluvial". Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- Chow, V. T. (1959) – "Open Channel Hydraulics", McGraw-Hill, New-York.
- Christodoulou, G. C. (1992). "Apparent Shear Stress in Smooth Compound Channels". Water resources Management 6, pp. 235-247
- Elliot, S. C. A. e Sellin, R. J. (1990) "A SERC Flood Channel Facility: Skewed Flow Experiments". Journal of Hydraulic Res. 28(2), pp. 197-214.
- Fernandes, J. N., Leal, J. B. e Cardoso, A. H. (2010). "Ultrasound Velocity Profile (UVP) Measurements in Shallow Open-Channel Flows". Proceedings of the 1st IAHR European Congress, Maio, Edimburgo, Escócia.
- Goring, D. G. Nikora, V. I. (2002). "Despiking acoustic Doppler velocimeter records". Journal of Hydraulic Engineering, 128, 117-126.
- Kantoush, S.A. De Cesare, G. Boillat, J.L. Schleiss, A.J. (2008). "Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling". Flow Measurement and Instrumentation, 19, 3-4: 139-144.
- Knight, D.A., e Demetriou, J.D., (1983), "Flood Plain and Main Channel Flow Interaction". Journal of Hydraulic Engineering, 109,8,1073-1092.

- Knight, D. W. e Hamed, M. (1984). "Boundary Shear in Symmetrical Compound Channels". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, pp. 1412-1430.
- Knight, D. W. (1992) "SERC Flood Channel Facility experimental data – Phase A, Vols 1-15, School of Civil Engineering , The University of Birmingham.
- Knight, D.W. (2001) "Conveyance in 1-D River Models-Scoping Study on Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance". The University of Birmingham.
- Moreta J.M. e Martin-Vide J.P. (2010) "Apparent friction coefficient in straight compound channels" Journal of Hydraulic Research, 48, nº2, pp. 169-177.
- Massey, B. S. (2002). "Mecânica dos fluidos". Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- Metflow (2002). "*UVP Monitor Model UVP-DUO - Users guide*". Metflow SA, Lausanne, Switzerland.
- Myers, W. R. C. (1978). "Momentum transfer in a compound channel". Journal of Hydraulic Research, 16, nº2, pp. 139-150.
- Myers, W. R. C., Lyness, J. F. e Cassels, J. (2001). "Influence of boundary roughness on velocity and discharge in compound river channels". Journal of Hydraulic Research, Vol. 39, nº39, pp. 311-319.
- Nezu, I. e Nakagawa, H. (1993). "Turbulence in Open-Channel Flows". Balkema.
- Nezu, I. (1994). "Compound Open-Channel Turbulence and its Role in River Environment". Department of Civil and Global Environment Engineering, Kyoto University, Japan.
- Nezu, I. (2005). "Open-Channel Flow Turbulence and Its Research Prospect in the 21st Century". Journal of hydraulic engineering, pp. 229-246.
- Nicollet, G., Uan, M. (1979). "Ecoulements à surface libre en lits composés". La Houille Blanche n. 1, pp. 21-30.
- Ozaki, Y. Kawaguchi, T. Takeda, Y. Hishida, K. e Maeda, M. (2002). "High time resolution ultrasonic velocity profiler". Experimental Thermal and Fluid Science, 26: 253-258.
- Patel, V. C. (1965). "Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients". Cambridge University.

- Pinto, D. (2010) “Caracterização experimental de escoamentos em canais de secção composta”. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- Preston, J. H. (1954) “The determination of turbulent skin friction by means of Pitot tubes”. Cambridge University.
- Prinos, P. e Townsend, R. D. (1984). “Comparison of methods for predicting discharge in compound open channels“. Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Ottawa, Canada.
- Prooijen, B. C. V. e Uijttewaal, W.S. J. (2002). “A linear approach for the evolution of coherent structures in shallow mixing layers”. American Institute of Physics, pp. 4105-4114.
- Prooijen, B. C. V., Battjes, J. A. e Uijttewaal, W. S. J. (2005). “Momentum exchange in straight uniform compound channel flow”. Journal of Hydraulic Engineering, 131(3), pp. 175-183.
- Proust, S., (2005). “Ecoulements non-uniformes en lits composes: effets de variations de largeur du lit majeur” Tese de Doutoramento. Institut National des Sciences Appliquees de Lyon.
- Proust, S., Bousmar, D., Riviere, N., Paquier A. e Zech, Y. (2010). “Energy losses in compound open channels”. Advances in Water Resources, Elsevier, 33 1-16.
- Quintela, A.C. (1981). “Hidráulica”. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- Rowiński, M., Aberle, J. e Mazurczyk, A. (2005). “Shear velocity estimation in hydraulic research”. Acta Geophysica Polonica, Vol.53, nº4, pp. 567-583.
- Shiono, K. e Knight, D.W. (1991). “Turbulent open channel flows with variable depth across the channel”. Journal of Fluid Mechanics, 222, pp. 617–646.
- Takeda, Y. (1995). “Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method”. Experimental Thermal and Fluid Science, 10, pp. 444-453.
- Takeda, Y. e Kikura, H. (2002). “Flow mapping of the mercury flow”. Experiments in Fluids, 32, pp. 161-169.
- Uijttewaal, W. S. J. e Booij, R. (2000). “Effects of shallowness on the development of free-surface mixing layers”. Physics of fluids, Vol. 12, pp.393-402.
- Vennard, J.K. e Street, R.L. (1978) “Elementary Fluid Mechanics”.

- Wiklund, J. A. Stading, M. Pettersson, A. J. Rasmuson, A. (2006). "A Comparative Study of UVP and LDA Techniques for Pulp Suspensions in Pipe Flow", American Institute of Chemical Engineers Journal 52, 484-495.
- Wormleaton, P. R., Allen, J., e Hadjipanos, P., (1982), "Discharge Assessment in Compound Channel Flow" Journal of hydraulic engineering. Volume 109, Issue 11, pp. 975-993.
- Wormleaton, P. R., e Merret, D.J., (1990) "An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/floodplain sections" J. Hydr. Res. 28(2), pp. 157-174.
- Yuen, K. W. H. (1989). "A study of boundary shear stress, flow resistance and momentum transfer in open channels with simple and compound trapezoidal cross sections". The University of Birmingham.