



**Andreia Filipa Alves Lopes**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

**Estudo laboratorial de correntes de  
densidade *quasi*-permanentes sobre  
leito rugoso e liso**

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

Orientador: Professor Doutor Mário Jorge Rodrigues Pereira da  
Franca, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Professor Doutor Rui Miguel Lage Ferreira,  
Professor Auxiliar, Instituto Superior Técnico

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno da Costa Guerra

Arguente: Doutora Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves

Vogais: Prof. Doutor Mário Jorge Rodrigues Pereira da Franca  
Prof. Doutor Rui Miguel Lage Ferreira



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2013





**Estudo laboratorial de correntes de densidade *quasi*-permanentes sobre leito rugoso e liso**

Copyright © Andreia Filipa Alves Lopes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

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



# Agradecimentos

Ao longo da realização desta dissertação foram muitas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso do meu percurso académico e não poderia de deixar de agradecer a essas pessoas.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Mário Franca, pela oportunidade de realizar este trabalho, pelo apoio, pela disponibilidade e pelos conhecimentos científicos transmitidos. As suas críticas e sugestões permitiram o desenvolvimento e conclusão desta dissertação.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer ao meu co-orientador Prof. Rui Ferreira, pelo esforço em acompanhar de perto a realização das tarefas laboratoriais, e pelas sugestões apresentadas sobretudo na programação com o software Matlab.

À Helena Nogueira, pela disponibilidade permanente, pela simpatia, pela boa vontade e principalmente pelo apoio no trabalho laboratorial. À Ana Ricardo, pela grande ajuda nas rotinas do Matlab, pelos conselhos dados e especialmente pelo incentivo. Ao Pedro Sanches, pelo apoio incansável no decorrer dos trabalhos laboratoriais, a sua iniciativa, disponibilidade e entusiasmo foram essenciais ao longo de todo o processo. Ao João Pedro, pelo apoio técnico e disponibilidades nas actividades laboratoriais.

Ao meu colega João Simões pela boa vontade em ajudar-me ao longo destes anos académicos e pelo apoio permanente no LaTeX.

À minha colega e grande amiga Cláudia Ferreira, pela sua sinceridade, pela motivação, pela cumplicidade, pela ajuda constante nestes anos e principalmente pela disponibilidade e vontade em acompanhar de perto a realização desta dissertação. À Carla, Margarida e Helena, pelos momentos de estudo e convívio que passámos juntas, pelo incentivo, e pela confiança que transmitiram ao longo destes anos académicos.

Ao meu companheiro Miguel Rodrigues, que sempre me apoiou em todos os momentos, agradeço a compreensão, paciência, amor e acima de todo a amizade. A sensatez com que me aconselhou foi fundamental ao longo deste caminho.

Aos meus familiares e amigos, pelo carinho e motivação. Quero fazer um agradecimento especial ao meu irmão e aos meus pais, pelo apoio incondicional em todas as decisões tomadas, pela proteção constante, mas principalmente pelo amor e carinho. Sem eles a realização deste sonho não era possível.

Agradeço o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia, FCT, através do projeto PTDC/ECM/09975272008.



# Resumo

A ocorrência de correntes de densidade em lagos e albufeiras é um assunto de grande importância na gestão de qualidade de água e segurança industrial, devido à sua capacidade de transportar sedimentos e poluentes nocivos ao longo do seu desenvolvimento. Neste sentido torna-se essencial investigar a dinâmica da corrente de densidade, nomeadamente quais as condicionantes que sustentam a estrutura turbulenta.

A presente dissertação tem como objetivo descrever e caracterizar a estrutura turbulenta de correntes de densidade conservativas *quasi*-permanentes sobre fundo liso e rugoso, para duas diferentes densidades iniciais da corrente. Neste sentido, foram realizados trabalhos laboratoriais que consistem na medição de velocidades instantâneas no corpo da corrente de densidade, com recurso a um equipamento não-intrusivo, o *Particle Image Velocimetry* (PIV). O processamento das velocidades instantâneas obtidas é realizado através da aplicação da metodologia da dupla-média (DAM), no tempo e no espaço, que possibilita a caracterização da heterogeneidade do escoamento provocada pelo leito.

Nos ensaios pretende-se investigar a influência do excesso de massa volúmica entre a corrente de densidade e o meio ambiente e a influência do leito na estrutura turbulenta da corrente de densidade, através da análise das velocidades, vorticidade, tensões de Reynolds, tensões dispersivas e da energia cinética turbulenta.

Com base nos resultados obtidos observa-se que o movimento da corrente de densidade origina um fluxo de retorno. De uma forma geral, verifica-se que a rugosidade do leito induz uma redução da velocidade da corrente de densidade em comparação com correntes de densidade sobre leito liso, e que o aumento excessivo de densidade induz um aumento da velocidade da corrente de densidade. Relativamente às tensões de Reynolds verifica-se que as tensões normais longitudinais de Reynolds são elevadas na camada de mistura associadas às instabilidades de Kelvin-Helmholtz, e as tensões de corte são significativas perto do leito.

## Palavras chave:

Correntes de densidade *quasi*-permanentes, metodologia da dupla-média, *Particle Image Velocimetry*, instabilidades de Kelvin-Helmholtz



# Abstract

The occurrence of density currents in lakes and reservoirs is a matter of great importance in the management of water quality and industrial safety, due to its ability to carry sediment and harmful pollutants along its development. In this sense it becomes essential to investigate the dynamics of the current density, which particular constraints that maintain the turbulent structure.

This thesis aims to describe and characterize the structure of turbulent conservative quasi-steady density currents developing over a smooth and rough bed, for two different initial densities. In this sense, we performed laboratory experiments involving the measurement of instantaneous velocities in the body of the density current, using a non-intrusive equipment, the Particle Image Velocimetry (PIV). The processing of instantaneous velocities obtained is carried out by applying the Double-average methodology (DMA), in time and space, which makes possible the characterization of the flow heterogeneity.

In the tests we intended to investigate the influence of excess density between the density current and the environment and influence the structure of the bed turbulent density current through the analysis of velocities, vorticity, Reynolds stresses, dispersive stresses and energy turbulent kinetic.

Based on the results, we observed that the movement of the density current leads to a return flow. In general, it appears that the bed roughness induces a reduction of the speed of the density current compared to density current on the bed flat, and the increase in density leads to an increase in the velocity of the density. In relation to the Reynolds stress it appears that longitudinal Reynolds normal stresses are high in mixing layer caused by Kelvin-Helmholtz instabilities and the shear stresses are significant near the bed.

## Keywords:

Density current *quasi-steady*, Double-average methodology, Particle Image Velocimetry, Kelvin-Helmholtz instabilities





# Índice de Matérias

Copyright	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xvii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xix
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Objetivo e metodologia . . . . .	3
1.3 Organização da dissertação . . . . .	3
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 Enquadramento . . . . .	5
2.2 Caracterização do desenvolvimento de correntes de densidade . . . . .	7
2.3 Caracterização da estrutura interna de correntes de densidade . . . . .	11
2.3.1 Considerações gerais . . . . .	11
2.3.2 Perfil vertical de velocidade e de concentração de correntes de densidade . . . . .	12
2.3.3 Estrutura turbulenta de correntes de densidade . . . . .	16
2.4 Modelação Matemática . . . . .	21
2.4.1 Enquadramento . . . . .	21
2.4.2 Equações hidrodinâmicas . . . . .	23
2.4.3 Metodologia dupla média . . . . .	25
<b>3 Instalações laboratoriais e equipamentos de medição</b>	<b>31</b>
3.1 Introdução . . . . .	31
3.2 Canal experimental . . . . .	32
3.3 Caracterização do ensaio . . . . .	35
3.4 Equipamento de medição . . . . .	38
3.4.1 Noções gerais sobre o PIV . . . . .	38
3.4.2 Sistema de <i>laser</i> e sistema de captação . . . . .	39
3.4.3 Sistema de sincronização, processamento e análise de dados . . . . .	42

## ÍNDICE DE MATÉRIAS

3.4.4	Partículas traçadoras . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Procedimento experimental e tratamento de dados</b>	<b>51</b>
4.1	Introdução . . . . .	51
4.2	Procedimento experimental . . . . .	51
4.3	Tratamento de dados . . . . .	58
4.3.1	Velocidades instantâneas . . . . .	58
4.3.2	Função de vazios . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Análise e discussão dos resultados</b>	<b>71</b>
5.1	Considerações gerais . . . . .	71
5.2	Escoamento médio temporal . . . . .	71
5.2.1	Variáveis hidrodinâmicas médias temporais . . . . .	71
5.2.2	Descrição da distribuição de velocidades, vorticidade e tensões de Reynolds médias temporais . . . . .	73
5.2.3	Análise dos perfis de escoamento médio temporal . . . . .	81
5.3	Escoamento médio espacial-temporal . . . . .	90
5.3.1	Variáveis hidrodinâmicas médias espacial-temporal . . . . .	90
5.3.2	Análise e descrição detalhada dos perfis de escoamento médio espacial-temporal . . . . .	90
5.4	Caracterização do Escoamento . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Conclusão e desenvolvimentos futuros</b>	<b>103</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>107</b>
<b>A</b>	<b>Equações hidrodinâmicas</b>	<b>111</b>
A.1	Equação de conservação massa . . . . .	111
A.2	Equação de conservação quantidade de movimento . . . . .	112
<b>B</b>	<b>Escoamento médio espacial-temporal</b>	<b>115</b>
B.1	Conjunto de ensaios da posição P1 . . . . .	115
B.2	Conjunto de ensaios da posição P2 . . . . .	118

# Índice de Figuras

1.1	a) Intrusão de um fluxo poluído no rio Ohio (disponível em <a href="http://www.pollutionissues.com/Li-Na/Mining.html">http://www.pollutionissues.com/Li-Na/Mining.html</a> , consultada em 20 de Junho 2013); b) avalanche de pó de neve no norte de Dolent (Ancey, 2012).	2
2.1	Possíveis movimentos de correntes de densidade numa albufeira: a) corrente de densidade de superfície; b) corrente de densidade de fundo; c) corrente de densidade intermédia. . . . .	6
2.2	Representação da dinâmica da cabeça de correntes de densidade de fundo (adaptado de Mok et al. (2003)). . . . .	7
2.3	Corrente salina constante, em regime rápido, sobre um leito composto por sedimentos (Sequeiros et al., 2010). . . . .	8
2.4	Representação de uma submersão de uma corrente de densidade <i>quasi</i> -permanente (adaptado de Pawlak e Armi (2000)). . . . .	11
2.5	Perfil vertical de velocidade longitudinal (adaptado de Kneller et al. (1999)).	13
2.6	Perfil vertical de densidade/concentração (adaptado de Kneller e Buckee (2000)). . . . .	14
2.7	Representação da distribuição das tensões tangenciais de Reynolds na cabeça (adaptado de Kneller et al. (1999)). . . . .	18
2.8	Comparação entre corrente salina, corrente turbidez com partículas finas e corrente de turbidez com partículas grosseiras: A) perfil vertical de velocidade longitudinal; B) perfil vertical da energia cinética turbulenta; C) perfil vertical de concentração (adaptado de Felix (2002)). . . . .	21
2.9	Interação entre turbulência, velocidade e concentração (adaptado de Felix (2002)). . . . .	22
3.1	CRIV: a) vista geral (Ricardo, 2008, p. 41); b) pormenor. . . . .	31
3.2	Elementos do CRIV: a) fundo liso em alumínio; b) parede lateral em vidro transparente; c) sistema de regularização da altura do canal. . . . .	32
3.4	a) bomba submersível; b) funil circular, tubo de plástico flexível e válvula de seccionamento; c) calha metálica e estabilizador. . . . .	35
3.5	a) tanque de mistura; b) tanque de descarga; c) sistema de drenagem. . . .	35
3.6	a) picnómetro de vidro; b) balança de precisão; c) hidrómetro instalado num suporte móvel. . . . .	36
3.7	Elementos do sensor de deslocamento a <i>laser</i> CCD: a) cabeça do sensor; b) controlador do sensor. . . . .	37
3.8	Esquema do funcionamento do sensor de deslocamentos a <i>laser</i> CCD (adaptado de Keyence (sd)). . . . .	38
3.9	Sistema de aquisição de dados: a) <i>hardware</i> modular; b) <i>software</i> . . . . .	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

3.10	Esquema de funcionamento do PIV (disponível em <a href="http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1049">http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1049</a> , consultada em 13 de Março 2013).	39
3.11	Sistema de <i>laser</i> : a) cabeça de <i>laser</i> ; b) gerador de energia.	40
3.12	Medidas de segurança: a) Oculos de proteção; b) sinalização de utilização do <i>laser</i> .	41
3.13	Sistema de captação: a) Câmara CCD; b) Imagem de partículas.	42
3.14	Elementos do sistema de sincronização, processamento e análise de dados: a) dispositivos de sincronização; b) software DynamicStudio®.	42
3.15	a) Mapa de correlação cruzada tridimensional; b) deslocamento médio do grupo de partícula.	44
3.16	a) Mapa de correlação cruzada de alta precisão; b) Mapa de correlação cruzada de baixa precisão.	44
3.17	Dispersão de luz para partículas de vidro esféricas na água: a) 10 $\mu\text{m}$ de diâmetro; b) 30 $\mu\text{m}$ de diâmetro (Adaptado de (Raffel et al., 2007, p. 20)).	47
3.18	Imagem microscopia digital: a) DECOSOFT 60 transparente; b) DECOSOFT 60 branco.	49
3.19	$r_p$ em função da frequência para as partículas DECOSOFT 60 transparente (-) e DECOSOFT 60 branco (-), com 60 $\mu\text{m}$ de diâmetro.	50
4.1	a) Localização da zona de medição (P1 e P2); b) leito rugoso; c) leito liso.	52
4.2	Relação entre a quantidade de sal adicionado a 450 litros de água e a densidade de mistura.	54
4.3	a) Sistema de nível de bolha de ar para verificação do declive do canal; b) medição da altura da coluna de água.	55
4.4	a) Posicionamento da câmara; b) objeto graduado; c) processo de alinhamento da folha de luz.	56
4.5	Partículas traçadoras DECOSOFT 60 branco.	56
4.6	a) Bomba submersível colocada no tanque de mistura; b) processo de abastecimento do funil; c) termómetro digital.	58
4.7	Representação gráfica do processo de medição da topografia.	59
4.8	Exemplo de registo de imagem para o ensaio R1 posição P1: a) imagem do objeto graduado; b) imagem do ponteiro (neste caso o ponteiro encontra-se a 9.87 cm).	60
4.9	Exemplo de imagem mascarada para o ensaio R1 posição P1.	61
4.10	Exemplo de validação de dados com recurso ao método <i>Phase-Space Thresholding</i> para o ensaio R1 posição P1.	61
4.11	Representação esquemática das zonas do escoamento.	62
4.12	Mapas das funções de vazios temporais para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.	63
4.13	Mapas das funções de vazios temporais para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.	64
4.14	Sobreposição de perfis de funções de vazios temporais para a posição P1: a) ensaios R1 e R2; b) ensaios S1 e S2; c) ensaios R1 e S1; d) ensaios R2 e S2.	65
4.15	Sobreposição de perfis de funções de vazios temporais para a posição P2: a) ensaios R1 e R2; b) ensaios S1 e S2; c) ensaios R1 e S1; d) ensaios R2 e S2.	66
4.16	Sobreposição de perfis longitudinais da malha com uma extensão de 13 cm.	67
4.17	Sobreposição da função de vazios espacial obtida pelo levantamento topográfico (-) e pela máscara (-)	67

4.18	Sobreposição de perfis de funções de vazios temporais ( $\psi_{temp}$ ) e espacial ( $\psi_{esp}$ ) para a posição P1: a) ensaios R1; b) ensaios R2; c) ensaios S1; d) ensaios S2. . . . .	68
4.19	Sobreposição de perfis de funções de vazios temporais ( $\psi_{temp}$ ) e espacial ( $\psi_{esp}$ ) para a posição P2: a) ensaios R1; b) ensaios R2; c) ensaios S1; d) ensaios S2. . . . .	69
5.1	Série temporal da velocidade longitudinal do ensaio S1, posição P1. . . . .	72
5.2	Mapa de velocidade longitudinal média temporal ( $m/s$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	74
5.3	Mapa de velocidade longitudinal média temporal ( $m/s$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	75
5.4	Mapa de velocidade vertical média temporal ( $m/s$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	76
5.5	Mapa de velocidade vertical média temporal ( $m/s$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	77
5.6	Mapa de vorticidade média temporal ( $s^{-1}$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	78
5.7	Mapa de vorticidade média temporal ( $s^{-1}$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	79
5.8	Mapa de tensão normal longitudinal de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	80
5.9	Mapa de tensão normal longitudinal de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	81
5.10	Mapa de tensão normal vertical de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	82
5.11	Mapa de tensão normal vertical de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	83
5.12	Mapa de tensão tangencial de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	84
5.13	Mapa de tensão tangencial de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2. . . . .	85
5.14	Perfis verticais das quantidades turbulentas médias temporais para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2. . . . .	86
5.15	Perfis verticais das quantidades turbulentas médias temporais para a posição P1: a) ensaio S1; b) ensaio S2. . . . .	87
5.16	Perfis verticais das quantidades turbulentas médias temporais para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2. . . . .	88
5.17	Perfis verticais das quantidades turbulentas médias temporais para a posição P2: a) ensaio S1; b) ensaio S2. . . . .	89
5.18	Diagrama de polígonos de Voronoï do ensaios R1, posição P1. . . . .	91
5.19	Velocidade média longitudinal (-) e vertical (-) e vorticidade média (-): a) ensaio R2, posição P1; b) ensaio S2, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	91
5.20	Gradiente vertical da velocidade longitudinal média: a) ensaio R2; b) ensaio S2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

5.21	Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) de Reynolds média: a) ensaio R2, posição P1; b) ensaio S2, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	93
5.22	Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) média dispersivas: a) ensaio R2, posição P1; b) ensaio S2, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	94
5.23	Energia cinética turbulenta, posição P1: a) ensaio R2; b) ensaio S2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	95
5.24	Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P1: a) velocidade longitudinal; b) velocidade vertical. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). . .	97
5.25	Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P2: a) velocidade longitudinal; b) velocidade vertical. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). . .	97
5.26	Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P1: a) tensão normal longitudinal de Reynolds; b) tensão normal longitudinal dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura. . . . .	99
5.27	Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P2: a) tensão normal longitudinal de Reynolds; b) tensão normal longitudinal dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura. . . . .	100
5.28	Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P1: a) tensão normal vertical de Reynolds; b) tensão normal vertical dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura. . . . .	100
5.29	Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P2: a) tensão normal vertical de Reynolds; b) tensão normal vertical dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura. . . . .	101
5.30	Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P1: a) tensão tangencial de Reynolds; b) tensão tangencial dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura. . . . .	101
5.31	Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P2: a) tensão tangencial de Reynolds; b) tensão tangencial dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura. . . . .	102
B.1	Velocidade média longitudinal (-) e vertical (-) e vorticidade média (-): a) ensaio R1, posição P1; b) ensaio S1, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	115
B.2	Gradiente vertical da velocidade longitudinal média: a) ensaio R1; b) ensaio S1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	116

B.3	Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) de Reynolds média: a) ensaio R1, posição P1; b) ensaio S1, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	116
B.4	Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) média dispersivas: a) ensaio R1, posição P1; b) ensaio S1, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	117
B.5	Energia cinética turbulenta, posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio S1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	117
B.6	Velocidade média longitudinal (-) e vertical (-) e vorticidade média (-): a) ensaio R1, posição P2; b) ensaio S1, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	118
B.7	Velocidade média longitudinal (-) e vertical (-) e vorticidade média (-): a) ensaio R2, posição P2; b) ensaio S2, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	118
B.8	Gradiente vertical da velocidade longitudinal média: a) ensaio R1; b) ensaio S1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	119
B.9	Gradiente vertical da velocidade longitudinal média: a) ensaio R2; b) ensaio S2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	119
B.10	Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) de Reynolds média: a) ensaio R1, posição P2; b) ensaio S1, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	120
B.11	Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) de Reynolds média: a) ensaio R2, posição P2; b) ensaio S2, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	120
B.12	Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) média dispersivas: a) ensaio R1, posição P2; b) ensaio S1, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	121
B.13	Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) média dispersivas: a) ensaio R2, posição P2; b) ensaio S2, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	121
B.14	Energia cinética turbulenta, posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio S1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	122
B.15	Energia cinética turbulenta, posição P1: a) ensaio R2; b) ensaio S2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura. . . . .	122





# Índice de Tabelas

2.1	Parâmetros de normalização característicos da corrente de densidade. . .	15
3.1	Características do sensor de deslocamento a <i>laser</i> CCD. . . . .	37
3.2	Características do sistema de <i>laser</i> . . . . .	41
4.1	Massa e massa volúmica da mistura de água salina para cada ensaio. . . .	53
4.2	Váriaveis de aquisição do sistema PIV. . . . .	57
4.3	Temperatura do escoamento ( $^{\circ}\text{C}$ ). . . . .	57
4.4	Fator de calibração ( $\times 10^{-5} \text{ m/pixel}$ ). . . . .	60
4.5	Parâmetro de adimensionalização, $H$ ( $\text{cm}$ ). . . . .	64
4.6	Espessura da camada de mistura, $\delta_{cm}$ ( $\text{cm}$ ). . . . .	65
4.7	Espessura da camada de superficial, $\delta_r$ ( $\text{cm}$ ). . . . .	68
5.1	Parâmetros de normalização, para a posição P1. . . . .	91
5.2	Parâmetros adimensionais da corrente de densidade. . . . .	96
5.3	Altura em que ocorre a velocidade máxima. . . . .	98



# Lista de abreviaturas, acrónimos e símbolos

## Simbologia

Símbolo	Descrição	Dimensão
$A$	Área total do domínio de aplicação do operador média espacial	$[L^2]$
$A_f$	Área ocupada pelo fluido	$[L^2]$
$A_t$	Área total do campo de medição	$[L^2]$
$A_k$	Área de influência do subdomínio convexo $\Omega_k$	$[L^2]$
$A$	Área total	$[L^2]$
$c$	Concentração da massa do sal	$[-]$
$C_s$	Dispersão da seção transversal da partícula de <i>seeding</i>	$[-]$
$Cov_{u,w}$	Covariância não enviesada de uma amostra finita	$[L^2T^{-2}]$
$d_p$	Diâmetro médio das partículas de <i>seeding</i>	$[L]$
$d_i$	Deslocamento do grupo de partículas de <i>seeding</i> segundo a direção $i$	$[L]$
$d_x$	Deslocamento longitudinal da partícula de <i>seeding</i>	$[L]$
$d_y$	Deslocamento vertical da partícula de <i>seeding</i>	$[L]$
$Fr$	Número de Froude	$[-]$
$Fr_d$	Número de Froude densimétrico	$[-]$
$f$	Frequência de aquisição	$[T^{-1}]$
$f_c$	Frequência da estrutura turbulenta do escoamento	$[T^{-1}]$
$f_{cal}$	Factor de calibração para converter unidades da câmara em unidades SI	$[-]$
$g$	Aceleração de gravidade	$[LT^{-2}]$
$g'$	Aceleração de gravidade reduzida	$[LT^{-2}]$
$g_j$	Componente de aceleração de gravidade segundo a direção $j$	$[LT^{-2}]$
$h_c$	Altura do corpo da corrente de densidade	$[L]$
$h_d$	Altura média da corrente de densidade	$[L]$
$h_{máx}$	Altura da velocidade máxima da corrente de densidade	$[L]$
$H$	Altura total do escoamento	$[L]$
$H_c$	Altura da cabeça da corrente de densidade	$[L]$
$L_x$	Comprimento do domínio $\Omega$	$[L]$

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Dimensão
$L_y$	Largura do domínio $\Omega$	[L]
$m_i$	Massa da solução $i$	[M]
$n_i$	Componente normal do vetor unitário normal à interface sólido/líquido dirigida da parte sólida para a parte líquida	[-]
$n_i^*$	Componente normal do vetor unitário normal à interface sal/água dirigida do sal para a água	[-]
$N_I$	Número de mapas instantâneos	[-]
$N$	Número total de subdomínios	[-]
$N_0$	Número de subdomínios à cota $z$	[-]
$p$	Pressão local	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\bar{p}$	Pressão média temporal	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$p'$	Flutuação turbulenta da pressão	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\langle \bar{p} \rangle$	Pressão média temporal e espacial	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\tilde{p}$	Flutuação espacial da pressão média temporal	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$Ri$	Número de Richardson	[-]
$Rig$	Gradiente do número de Richardson	[-]
$Re$	Número de Reynolds	[-]
$s$	Densidade do sal	[-]
$S_{int}$	Superfície de interface entre a parte sólida e a parte líquida do volume de controlo	[L <sup>2</sup> ]
$S_{int}^*$	Superfície de interface entre o sal e a água ambiente	[L <sup>2</sup> ]
$t$	Variável tempo	[T]
$T_{ke}$	Energia cinética turbulenta	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$T_f$	Intervalo de tempo em que a variável genérica é uma propriedade da corrente de densidade	[T]
$T_o$	Intervalo de tempo total	[T]
$u$	Componente da velocidade segunda a direção longitudinal	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_*$	Velocidade de atrito	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_i$	Componente da velocidade segunda a direção $i$	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_i^{(s)}$	Componente da velocidade do sal segunda a direção $i$	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_i^{(w)}$	Componente da velocidade da água segunda a direção $i$	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_i^{(I)}$	Componente $i$ do vector de velocidade na interface sólido/líquido	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_i^{*(I)}$	Componente $i$ do vector de velocidade na interface sal/água	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_{amb}$	Velocidade do fluido ambiente	[LT <sup>-1</sup> ]
$u_{log m}$	Velocidade na superfície do escoamento equivalente a um escoamento de canal aberto	[LT <sup>-1</sup> ]
$\bar{u}$	Velocidade longitudinal média temporal	[LT <sup>-1</sup> ]
$u'$	Flutuação turbulenta da velocidade longitudinal	[LT <sup>-1</sup> ]
$\langle \bar{u} \rangle$	Velocidade longitudinal média temporal e espacial	[LT <sup>-1</sup> ]

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Dimensão
$\tilde{u}$	Flutuação espacial da velocidade longitudinal média temporal	[LT <sup>-1</sup> ]
$U_d$	Velocidade longitudinal média da corrente de densidade	[LT <sup>-1</sup> ]
$U_{máx}$	Velocidade longitudinal máxima da corrente de densidade	[LT <sup>-1</sup> ]
$v$	Componente de velocidade segundo a direção transversal	[LT <sup>-1</sup> ]
$v_f$	Velocidade do escoamento	[LT <sup>-1</sup> ]
$v_p$	Velocidade da partícula de <i>sedding</i>	[LT <sup>-1</sup> ]
$V_{pic}$	Volume do picnómetro	[L <sup>3</sup> ]
$V_f$	Volume de controlo do escoamento	[L <sup>3</sup> ]
$V_f^*$	Volume infinitesimal do escoamento	[L <sup>3</sup> ]
$w$	Componente de velocidade segundo a direção vertical	[LT <sup>-1</sup> ]
$\bar{w}$	Velocidade vertical média temporal	[LT <sup>-1</sup> ]
$w'$	Flutuação turbulenta da velocidade vertical	[LT <sup>-1</sup> ]
$\langle \bar{w} \rangle$	Velocidade vertical média temporal e espacial	[LT <sup>-1</sup> ]
$\tilde{w}$	Flutuação espacial da velocidade vertical média temporal	[LT <sup>-1</sup> ]
$x$	Coordenada segundo a direção longitudinal	[L]
$y$	Coordenada segundo a direção transversal	[L]
$z$	Coordenada segundo a direção vertical	[L]
$z_0$	Altura da rugosidade de velocidade nula	[L]
$z_{1/2}$	Altura em que a velocidade longitudinal do escoamento é metade da velocidade máxima	[L]
$\delta_{cm}$	Espessura da camada de mistura	[L]
$\delta_r$	Espessura da camada rugosa	[L]
$\Delta t$	Intervalo de tempo entre dois pulsos consecutivos	[T]
$\Delta d$	Distância entre dois pontos	[L]
$\Delta x$	Distância entre dois pontos adjacentes segundo a direção longitudinal	[L]
$\Delta z$	Distância entre dois pontos adjacentes segundo a direção vertical	[L]
$\Delta \rho$	Excesso de massa volúmica	[ML <sup>-2</sup> ]
$\langle \Delta \rho \rangle_d$	Excesso de massa volúmica médio da corrente de densidade	[ML <sup>-2</sup> ]
$\langle \Delta \rho \rangle_{máx}$	Excesso de massa volúmica máximo da corrente de densidade	[ML <sup>-2</sup> ]
$\eta$	Vorticidade perpendicular ao plano de medição	[T <sup>-1</sup> ]
$\bar{\eta}$	Vorticidade média temporal perpendicular ao plano de medição	[T <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Comprimento de onda da luz incidente	[L]
$\kappa$	Constante de von Kármán	[-]
$\mu^{(w)}$	Viscosidade dinâmica da água	[ML <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$\mu_i$	Viscosidade dinâmica da corrente de densidade	[ML <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$\mu_f$	Viscosidade dinâmica do escoamento	[ML <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup> ]
$\nu^{(w)}$	Viscosidade cinemática da água	[LT <sup>-1</sup> ]
$\nu_{(f)}$	Viscosidade cinemática do escoamento	[LT <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Massa volúmica do fluido	[ML <sup>-2</sup> ]
$\rho_a$	Massa volúmica do fluido ambiente	[ML <sup>-2</sup> ]

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Dimensão
$\rho_d$	Massa volúmica do partícula de <i>seeding</i>	$[ML^{-2}]$
$\rho_f$	Massa volúmica do escoamento	$[ML^{-2}]$
$\rho_i$	Massa volúmica da corrente de densidade	$[ML^{-2}]$
$\rho_p$	Massa volúmica das partículas de <i>seeding</i>	$[ML^{-2}]$
$\rho^m$	Massa volúmica média do fluido	$[ML^{-2}]$
$\rho^{(s)}$	Massa volúmica do sal	$[ML^{-2}]$
$\rho^{(w)}$	Massa volúmica da água	$[ML^{-2}]$
$-\rho^m \overline{u_j' u_i'}$	Tensor de tensões de Reynolds	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$-\rho^m \tilde{u}_i \tilde{u}_j$	Tensor de tensões dispersivas	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$\sigma_{ij}$	Tensor das tensões	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$\sigma_{ij}^{(s)}$	Tensor das tensões do sal	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$\sigma_{ij}^{(w)}$	Tensor das tensões da água	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$\psi$	Função de vazios	[-]
$\psi_{temp}$	Função de vazios temporal	[-]
$\psi_{esp}$	Função de vazios espacial	[-]
$\tau_{Re}$	Tensão tangencial de Reynolds	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$\tau_w$	Tensão de corte da camada limite	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$\varphi$	Função que expressa a concentração da massa da espécie	[-]
$\Omega$	Domínio espacial	[-]
$\Omega_k$	Subdomínio convexo pertencente ao domínio $\Omega$	[-]

Abreviaturas e acrónimos

Abreviaturas/Acrónimos	Descrição
ADV	<i>Acoustic Doppler velocimeter</i>
CCD	<i>Charge-coupled device</i> (Dispositivo de carga acoplada)
CRIV	Canal de Recirculação e inclinação variável
CS	Corrente salina
CTF	Corrente de turbidez composta por partículas finas
CTG	Corrente de turbidez composta por partículas grosseiras
DAQ	<i>Digital to analog converter</i> (Conversor de digital para analógico)
DAM	<i>Double-average methodology</i>
ECT	Energia cinética turbulenta
IF	Infra-vermelha
LabVIEW	<i>Laboratory virtual instrument engineering workbench</i>
LDA	<i>Laser doppler anemometry</i>
NI	<i>National instruments</i>
PIV	<i>Particle image velocimetry</i>
PIV-S	<i>Particle image velocimetry scalar</i>
PVC	Poli-cloreto de vinilo
SI	Sistema internacional

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS

<b>Abreviaturas/Acrónimos</b>	<b>Descrição</b>
SHG	Gerador de segunda harmonia
UDVP	<i>Ultrasonic doppler velocity profiler</i>
YAG	<i>Yittrium Aluminium Garnet</i>
ZDL	Zona de difusão lenta





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

Correntes de densidade, também conhecidas como correntes de gravidade, são escoamentos estratificados caracterizados por uma movimentação entre dois fluidos. Este movimento é originado por uma força motriz resultante da diferença de densidades entre estes. Há uma grande variedade de possíveis causas para a diferença de densidade, nomeadamente variação de temperatura, alteração da composição do fluido através de substâncias dissolvidas ou materiais em suspensão, bem como uma combinação destas causas (Simpson, 1997; Kneller et al., 1999; Moodie, 2002; Alves, 2008, p. 14-16).

Este tipo de fenómenos pode ocorrer em ambientes fluviais, atmosféricos ou vulcânicos, podendo surgir de forma natural ou artificial. Plumas superficiais de água aquecida, intrusão salina ou intrusão de corpos de água com sedimentos em suspensão (Figura 1.1 a)), são exemplos de correntes de densidade que surgem em ambientes fluviais tais como rios, lagos ou oceanos. Frentes de brisa do mar e avalanches (Figura 1.1 b)) são exemplos de fenómenos atmosféricos, assim como fluxos subaéreos piroclásticos em ambientes vulcânicos (Simpson, 1997; Buckee et al., 2001; Dallimore et al., 2001; Moodie, 2002; Gerber et al., 2011; An et al., 2012). Derramamento de óleo na superfície do oceano, libertação de material poluente em rios, e libertação accidental de gases industriais densos são exemplos de correntes de densidade geradas pelo Homem, causando problemas de segurança industrial e proteção ambiental, sendo um aspeto importante da engenharia (Simpson, 1997; Nogueira et al., 2012).

Correntes de turbidez são um caso particular das correntes de densidade em ambientes fluviais, em que o excesso de densidade é obtido pela presença de sedimentos em suspensão numa massa de água e representam agentes importantes de transporte e deposição de sedimentos em albufeiras e lagos (Kneller e Buckee, 2000; Moodie, 2002; Alves et al., 2008; Meiburg e Kneller, 2010). O início de uma corrente de turbidez é geralmente atribuído à mobilização de sedimentos depositados em taludes, no entanto

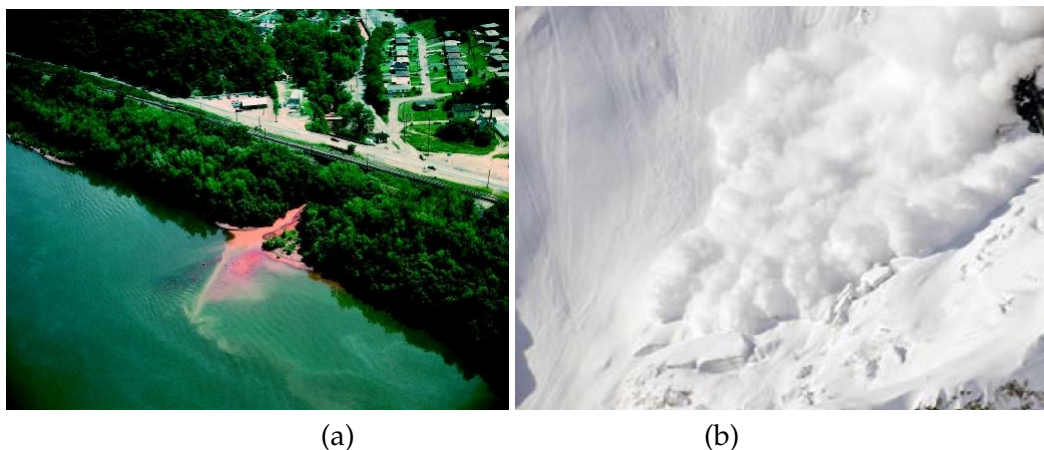


Figura 1.1: a) Intrusão de um fluxo poluído no rio Ohio (disponível em <http://www.pollutionissues.com/Li-Na/Mining.html>, consultada em 20 de Junho 2013); b) avalanche de pó de neve no norte de Dolent (Ancey, 2012).

correntes de turbidez geradas diretamente da descarga fluvial em lagos e mares representam um evento de maior preocupação (Kneller e Buckee, 2000; Althaus et al., 2008; Rossato e Alves, 2011). Em períodos de cheias, cursos de água apresentam elevada concentração de sedimentos que formam corpos de água compostos por partículas em suspensão. Estes ao apresentarem uma diferença de densidade mergulham na albufeira e propagam-se por flutuação, tornando-se numa avalanche subaquática. Em situações em que a diferença de densidade entre os fluidos permanece elevada, a corrente de turbidez pode propagar-se até à barragem depositando os sedimentos, e por conseguinte causando uma perda da capacidade de armazenamento de água, acumulação de sedimentos junto à estrutura de saída de uma barragem pondo em causa o funcionamento seguro e dispersão de poluente (Kneller e Buckee, 2000; Moodie, 2002; Alves et al., 2008; Althaus et al., 2008; Meiburg e Kneller, 2010).

Sendo as correntes de densidade a principal causa de introdução de poluentes nocivos em albufeiras, colocando em causa a qualidade da água e a sua gestão, é importante compreender a sua dinâmica, em particular os processos de mistura e de arrastamento que ocorrem ao longo do seu desenvolvimento, de modo a implementar soluções sustentáveis que minimizem o seu impacto ambiental (Nogueira et al., 2013b). A investigação de correntes de densidade no terreno apresenta um elevado grau de dificuldade devido à sua complicada e inesperada característica de ocorrência. Neste sentido, estudos laboratoriais e simulações numéricas são os principais métodos de estudo de parâmetros importantes da dinâmica das correntes, tais como velocidade de propagação, espessura e influência da composição da corrente e do leito sobre a estrutura interna (An et al., 2012).

O trabalho desenvolvido nesta dissertação foi apresentado e discutido na assembleia geral da European Geosciences Union, realizada em Viena entre 7 e 12 de Abril de 2013.

### 1.2 Objetivo e metodologia

A presente dissertação tem como objetivo descrever e caracterizar a estrutura turbulenta de correntes de densidade *quasi*-permanentes.

Neste sentido, serão realizados trabalhos laboratoriais no Canal de Recirculação e Inclinação Variável (CRIV) localizado no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, que consistem na simulação física de uma corrente de densidade conservativa *quasi*-permanente, originada pela intrusão de uma mistura salina,  $\rho_i$ , num fluido ambiente,  $\rho_a$ , em repouso com massa volúmica inferior.

O estudo da estrutura turbulenta baseia-se numa breve análise dos mapas das variáveis hidrodinâmicas médias no tempo, e uma análise detalhada dos perfis das variáveis turbulentas após o processamento dos dados obtidos através da medição de velocidades instantâneas no corpo da corrente de densidade com recurso a um equipamento não-intrusivo, o PIV. O processamento de dados é feito através da aplicação da metodologia dupla-média (DAM), no tempo e no espaço, às velocidades instantâneas.

De forma a melhorar a compreensão da influência da interação entre a corrente de densidade e o fluido ambiente, bem como a interação entre a corrente de densidade e o fundo, serão realizados ensaios que diferem na massa volúmica inicial da mistura salina ( $\rho = 1010 \text{ kg/m}^3$  e  $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$ ) e no tipo de leito (leito liso e leito rugoso). Serão analisados parâmetros que descrevem o comportamento hidrodinâmico da corrente de densidade, nomeadamente perfis de velocidade, de tensões de Reynolds e tensões dispersivas.

### 1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação é composta por 6 capítulos, com a seguinte organização.

No presente capítulo, apresenta-se o enquadramento do tema, objetivos e metodologia implementada.

No capítulo 2, realiza-se uma breve revisão sobre correntes de densidade, nomeadamente os conceitos teóricos, a sua morfologia e estrutura turbulenta. Apresenta-se a elaboração do modelo matemático simples que caracterize o escoamento e adaptação de

## *CAPÍTULO 1. ENQUADRAMENTO*

metodologia da dupla-média (DAM) ao caso em estudo.

No capítulo 3, apresenta-se uma descrição das instalações experimentais, em particular as alterações realizadas no canal experimental para a sua adaptação ao presente estudo, e dos equipamentos de medição utilizados para o trabalho experimental. É ainda apresentado uma breve descrição do funcionamento do sistema de medição da topografia do leito e uma descrição pormenorizada do funcionamento do equipamento PIV.

No capítulo 4, realiza-se uma descrição detalhada do procedimento experimental e do método de tratamento de dados. E ainda será realizada a quantificação da função de vazios temporais e espaciais.

No capítulo 5, apresenta-se a descrição da metodologia de cálculo das variáveis hidrodinâmicas médias no tempo e da aplicação da DAM, e a análise dos resultados. A discussão de resultados consiste numa breve análise dos mapas e perfis verticais das quantidades turbulentas médias no tempo, seguida de uma análise mais detalhada dos perfis médios no tempo e espaço de dois ensaios; por fim apresenta-se uma análise da influência da rugosidade e do excesso de densidade sobre a corrente de densidade.

No capítulo 6 apresenta-se as principais conclusões obtidas ao longo do trabalho experimental e sugestão de ideias a serem desenvolvidas numa investigação futura.

Na presente dissertação também serão incluídos anexos que complementam a informação dada.

## Capítulo 2

# Revisão bibliográfica

### 2.1 Enquadramento

A perda de capacidade de armazenamento de água em albufeiras associada à acumulação de sedimentos provenientes de correntes de turbidez é um assunto de elevada importância na elaboração de projetos de construção de barragens. Esta redução de armazenamento de água poderá minimizar a capacidade de regulação do escoamento, e por consequente por em causa o controlo de cheias e as funções de abastecimento (Alves, 2008, p. 5-6). Neste sentido, a investigação da estrutura interna de correntes de densidade, em particular a turbulência e quais os fatores que sustentam essa turbulência, é importante para a elaboração de soluções a implementar na construção de barragens e controle de qualidade de água (Kneller e Buckee, 2000).

Correntes de densidade podem ser classificadas como conservativas ou não conservativas. Uma corrente de densidade é considerada conservativa quando não existe variação da sua composição ao longo do percurso, por exemplo, corrente salina (Alves, 2008, p. 18-19; Sousa, 2011, p. 11-12). As correntes de turbidez são um exemplo de correntes de densidade não conservativa, na medida em que existe uma variação de densidade gradual originada pela troca de partículas com o leito a partir dos mecanismos de erosão e/ou deposição e troca de massa com o fluido ambiente por arrastamento ou evacuação (Alves, 2008, p. 18-19; Meiburg e Kneller, 2010; Sousa, 2011, p. 11-12).

As correntes de densidade também podem ser classificadas em função da estratificação do meio em que se propagam e da diferença de densidade entre os fluidos. Na Figura 2.1 apresenta-se três possíveis movimentos de uma corrente de densidade numa albufeira. No caso em que a corrente de densidade apresenta densidade inferior à do meio ambiente ( $\rho_i < \rho_a$ ), esta propaga-se na superfície, tornando-se numa corrente de densidade de superfície (*overflow* na literatura inglesa) (Figura 2.1 a)). Na situação em que a corrente de densidade tem densidade superior à do meio ambiente ( $\rho_i > \rho_a$ ),

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

a corrente de densidade propaga-se junto ao fundo, tornando-se numa corrente de densidade de fundo (*underflow* na literatura inglesa) (Figura 2.1 b)), típica de correntes de turbidez. A Figura 2.1 c) mostra um caso mais complexo de correntes de densidade, em que inicialmente a corrente é uma corrente de densidade de fundo tornando-se posteriormente numa corrente de densidade intermédia (*interflow* na literatura inglesa) (Gerber, 2008, p. 1-3; Alves, 2008, p. 17; Sousa, 2011, p. 11-12).

A ocorrência do caso da Figura 2.1 c) pode ser originada por diversos fatores, desde o meio ambiente apresentar uma forte estratificação, onde a corrente de densidade pode atingir o equilíbrio estável a uma certa profundidade e propagar-se no interior do meio ambiente. Outra possibilidade é quando o fluido intersticial da corrente de turbidez apresenta densidade menor ou igual à densidade do meio ambiente, o que significa que o único aspeto que provoca a diferença de densidade é as partículas em suspensão na corrente. Neste caso é possível que o mecanismos de deposição seja superior ao mecanismos de erosão originando uma redução da densidade do fluxo transformando a corrente de densidade de fundo numa corrente de densidade intermédia (Moodie, 2002; Gerber, 2008, p. 1-3).

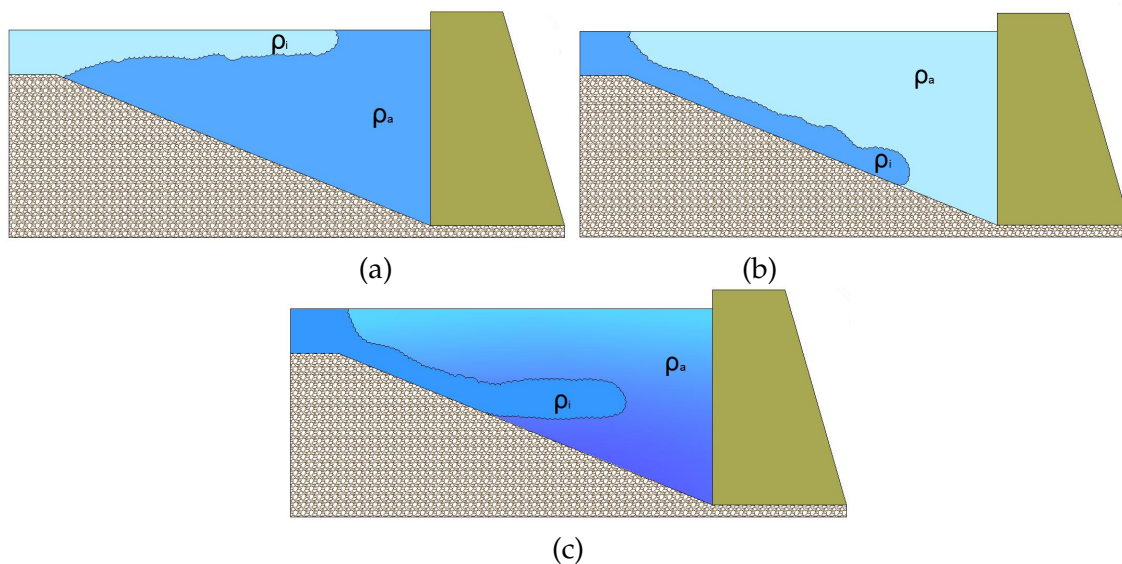


Figura 2.1: Possíveis movimentos de correntes de densidade numa albufeira: a) corrente de densidade de superfície; b) corrente de densidade de fundo; c) corrente de densidade intermédia.

## 2.2 Caracterização do desenvolvimento de correntes de densidade

A intrusão de uma corrente de densidade num fluido ambiente é acionada por uma força de gravidade, resultante da diferença de densidade, equilibrada pela força de atrito gerada na interface e na camada limite no caso de correntes de densidade de fundo, e pela força de inércia originada pelo deslocamento imposto ao fluido ambiente pela corrente de densidade. Correntes de densidade são descritas como tendo uma cabeça que exibe uma zona de mistura intensa com o fluido ambiente originada pelo avanço intrusivo no fluido ambiente, um corpo e em alguns casos uma cauda (Kneller e Buckee, 2000; Alves, 2008, p. 17-18; Sousa, 2011, p. 11-16).

Na Figura 2.2 é ilustrado uma representação da dinâmica da cabeça de uma corrente de densidade sobre uma superfície rígida. Esta é caracterizada por apresentar uma zona saliente na frente da corrente, designada por nariz, um desenvolvimento de vórtices transversais e uma esteira (*wake* na literatura inglesa) (Simpson, 1997; Kneller et al., 1999). Segundo Mok et al. (2003) a esteira, também conhecida como camada de mistura, é uma região do escoamento turbulenta originada por dois tipos de instabilidades: 1) turbilhões desenvolvidos na interface dos fluidos associados à resistência de atrito imposta; 2) instabilidades convectivas originadas pela influência do fundo sobre o limite inferior da corrente.

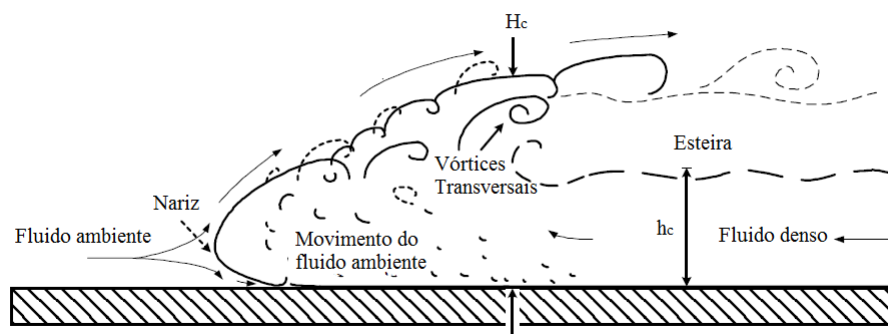


Figura 2.2: Representação da dinâmica da cabeça de correntes de densidade de fundo (adaptado de Mok et al. (2003)).

Com o avanço do fluido mais denso a resistência de atrito originada na interface gera vórtices transversais que colapsam a montante, originando uma região de intensa mistura entre dois fluidos, que tem influência sobre o resto da corrente (Simpson, 1997; Kneller et al., 1999; Alves, 2008, p. 25). Simpson (1997) através de estudos laboratoriais observou que a formação de vórtices transversais com origem no

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

arrastamento desenvolvido a montante da cabeça são semelhantes às instabilidades de Kelvin-Helmholtz.

A combinação entre a resistência de atrito na interface e na camada limite irá formar o nariz da corrente, a uma certa distância acima do leito que depende da magnitude da resistência imposta no fundo da corrente (Simpson, 1997). Esta saliência irá originar um arrastamento do fluido ambiente sob o nariz para o interior da corrente, onde o fluido ambiente torna-se um fluido flutuante no interior da cabeça, sendo responsável pela estrutura de lóbulos e fendas instáveis na interface, tornando-se no fluxo tridimensional (Figura 2.3) (Kneller et al., 1999).



Figura 2.3: Corrente salina constante, em regime rápido, sobre um leito composto por sedimentos (Sequeiros et al., 2010).

Simpson e Britter (1979) afirmam que a estrutura tridimensional instável não está associada à alteração da dinâmica do fluido ambiente no interior da corrente, mas sim à troca de quantidade de movimento que afeta o processo de mistura. Felix (2002) através de modelação numérica bidimensional investigou qual a característica da corrente (velocidade ou densidade) que poderá originar uma perda de quantidade de movimento e consequente redução da intensidade de mistura. Para uma velocidade  $u > 0$ , a perda de quantidade de movimento é indicado por  $\partial\rho u/\partial t = \rho(\partial u/\partial t) + u(\partial\rho/\partial t) < 0$ , o que implica que esta pode ser causada pela desaceleração do fluido ( $\partial u/\partial t < 0$ ) ou pela perda de densidade ( $\partial\rho/\partial t < 0$ ). Observou que correntes salinas ou correntes de turbidez compostas por partículas de dimensão reduzida são caracterizadas por apresentar um processo de deposição das partículas lento mantendo-se em suspensão durante mais tempo, o que significa que a perda de quantidade de movimento está associada à desaceleração da corrente de densidade. No caso de correntes de turbidez constituídas por partículas de dimensão elevada (por exemplo, areia) a turbulência do fluido não é suficiente para manter as partículas em suspensão depositando-se rapidamente no leito, o que origina uma elevada redução de densidade sendo a causa principal para a perda



## 2.2. CARACTERIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE CORRENTES DE DENSIDADE

da quantidade de movimento.

No caso de correntes de densidade intermédias as tensões impostas no fundo da corrente são inexistentes logo as instabilidades convectivas estão ausentes, o que implica que a intensidade da mistura entre os fluidos é apenas gerada pela vorticidade transversal nas interfaces. Outro tipo de escoamento em que a mistura turbulenta devesse apenas à resistência de atrito na interface entre os dois fluidos é o caso em que a corrente de densidade é não viscoso, ou seja, existe uma ausência completa da força de viscosidade impedindo o efeito de atrito no fundo da corrente (Simpson e Britter, 1979; Simpson, 1997).

Pode-se assim afirmar que a forma e a taxa de mistura dependem da influência das forças de gravidade, forças de inércia e forças de viscosidade. Esta influência pode ser determinada em laboratório a partir de parâmetros adimensionais adequados, especialmente o número de Froude,  $Fr$ , ou o número de Reynolds,  $Re$  (Kneller e Buckee, 2000).

O número de Froude,  $Fr$ , representa a razão entre as forças de inércia e as forças de gravidade que atuam sobre o fluxo. No entanto, modelos que se centram no número de Froude só são considerados adequados se o fluxo for completamente turbulento, o que por vezes é difícil de atingir em laboratório. Em correntes de densidade é utilizado o número de Froude densimétrico,  $Fr_d$ , em que a ação de gravidade depende da diferença de densidade fracionada entre a corrente de densidade e o fluido ambiente (Kneller e Buckee, 2000), e é obtido através,

$$Fr_d = \frac{U_d}{\sqrt{g'h_d}} \quad (2.1)$$

onde  $U_d$  e  $h_d$  é a velocidade longitudinal média e a altura média da corrente de densidade,  $g' = g(\Delta\rho/\rho_a)$  é a aceleração de gravidade reduzida,  $\Delta\rho = \rho_i - \rho_a$  é o excesso de massa volúmica,  $\rho_i$  e  $\rho_a$  é a massa volúmica da corrente de densidade e do fluido ambiente, respetivamente, e  $g$  é a aceleração de gravidade.

Vários autores utilizam o número de Richardson,  $Ri$ , para determinar o estado do regime da corrente. Este parâmetro é semelhante ao número de Froude densimétrico e é dado por,

$$Ri = \frac{1}{Fr_d^2} = \frac{g'h_d}{U_d^2} \quad (2.2)$$

Se  $Ri > 1$  (ou seja,  $Fr_d < 1$ ), as forças de inércia dominam as forças de flutuação tornando-se numa corrente lenta (*subcritical* na literatura inglesa). Isto indica que a

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

interface entre a corrente de densidade e o fluido ambiente encontra-se instável. A estabilidade reduzida aumenta a quantidade da mistura através da sua interface, o que por sua vez aumenta o arrastamento do fluido ambiente para a corrente de densidade. Se  $Ri < 1$  (ou seja,  $Frd > 1$ ) as forças de flutuação dominam as forças de inércia tornando-se numa corrente rápida (*supercritical* na literatura inglesa). Este tipo de corrente é caracterizado por apresentar uma interface estável, ou seja, um processo de mistura reduzido devido ao amortecimento da turbulência, resultando numa redução do arrastamento do fluido ambiente (Gerber, 2008, p. 7).

O número de Reynolds,  $Re$ , é um parâmetro característico para a definição do regime de escoamentos desenvolvidos sobre camada limite e representa a razão entre as forças de inércia e as forças de viscosidade,

$$Re = \frac{\rho_a U_d h_d}{\mu_i} \quad (2.3)$$

onde  $\mu_i$  representa a viscosidade dinâmica da corrente de densidade. Se  $Re > 2000$  a corrente de densidade é considerada turbulenta, logo o arrastamento é essencialmente motivado pelas instabilidades secundárias no limite superior. Caso  $Re < 500$  a corrente de densidade é considerada laminar e o arrastamento devesse principalmente ao efeito de viscosidade, originando uma taxa de mistura fraca (Kneller e Buckee, 2000; Nogueira et al., 2013a).

Segundo Pawlak e Armi (2000) para um plano inclinado suficientemente longo a corrente de densidade irá eventualmente atingir um estado de equilíbrio em que o balanço entre a produção de energia cinética e a perda por atrito são mantidas. É neste estado que o fluxo atinge o número de Richardson estável e velocidade de frente constante. Os autores investigaram os efeitos da aceleração e da flutuação na estrutura e do desenvolvimento da camada de mistura de uma corrente de densidade que propaga-se sobre um fundo inclinado. A Figura 2.4 ilustra as três regiões estudadas pelos autores, onde o fluxo apresenta características distintas. Na região I o fluxo adquire uma aceleração inicial associada ao controlo hidráulico, que origina um aumento da resistência de atrito e consequente desestabilização na interface provocada pelas instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Na região II a flutuação torna-se um mecanismo dominante limitando a dimensão das instabilidades na camada de mistura. A mistura é reduzida em relação à região I mas a entrada de energia resultante da aceleração conduz a um maior desenvolvimento da camada de mistura, e por conseguinte um aumento da espessura da corrente. A estabilidade da camada de mistura ocorre na região III, onde é atingido um equilíbrio entre as forças de inércia e de atrito resultando numa velocidade de frente constante e intensidade de mistura fraca devido aos efeitos de flutuação.

## 2.3. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA DE CORRENTES DE DENSIDADE

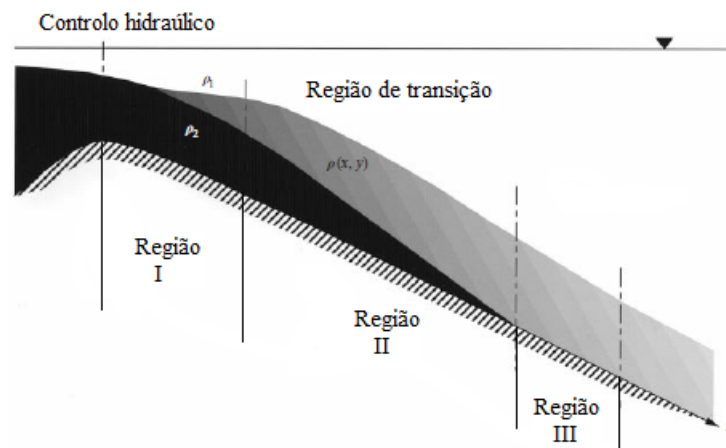


Figura 2.4: Representação de uma submersão de uma corrente de densidade *quasi*-permanente (adaptado de Pawlak e Armi (2000)).

Em suma, correntes de densidade exibem duas regiões principais distintas definidas pelas condições de contorno a que estão sujeitas. A cabeça apresenta uma zona de intensa turbulência que define a condição limite para a corrente como um todo. Esta quando se move sobre um fundo inclinado sofre um aumento da força de gravidade que é neutralizada pela resistência de atrito na interface originada pelo aumento da taxa de arrasto do fluido ambiente, adquirindo uma velocidade longitudinal constante. Em contrapartida, a velocidade do corpo da corrente depende da inclinação. Esta dependência devesse ao facto do corpo apenas resistir à força de arrasto atuante no fundo e na interface, sendo que a última com o aumento da inclinação sofre uma dissipação da turbulência e conseqüente diminuição da força de arrasto e aumento da velocidade do corpo. Relativamente à dimensão das regiões, a cabeça tem maior espessura que o resto da corrente, provocada pela intensa turbulência no seu interior. Esta aumenta linearmente com a inclinação para compensar o aumento da intensidade de mistura originada pelo aumento da quantidade de fluido denso proveniente do corpo (Simpson, 1997; Kneller e Buckee, 2000).

### 2.3 Caracterização da estrutura interna de correntes de densidade

#### 2.3.1 Considerações gerais

A turbulência da corrente de turbidez é um mecanismo primário para o arrastamento, suspensão e transporte de sedimentos e poluentes, controlando também indiretamente a deposição dos sedimentos. A descrição qualitativa e quantitativa da estrutura interna é

essencial para compreender quais os aspetos que influenciam a turbulência e melhorar a previsão do comportamento da corrente de turbidez (Buckee et al., 2001). Inicialmente os estudos estavam direcionados para a descrição da morfologia da corrente (por exemplo, Simpson e Britter, 1979), mas com a evolução dos equipamentos de medição foi possível investigar a estrutura interna através de perfis verticais de propriedades do fluxo médio (por exemplo, Kneller et al., 1999; Dallimore et al., 2001; Buckee et al., 2001; Felix, 2002; Gray et al., 2005; Alves, 2008; Sequeiros et al., 2010; Gerber et al., 2011; Nogueira et al., 2012).

### 2.3.2 Perfil vertical de velocidade e de concentração de correntes de densidade

Segundo Kneller et al. (1999) o perfil de velocidades longitudinal,  $u$ , representa uma função da resistência do limite superior e inferior, e do gradiente de densidade. Deste modo, o perfil total pode ser considerado como a soma de dois perfis de velocidade, um relacionado com a camada limite e outro com o limite superior difuso.

No caso da camada limite, a tensão de corte cria um perfil de velocidade logarítmica. Para correntes de densidade a função é dada por,

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (2.4)$$

A equação (2.4) é semelhante à equação von Kármán-Prandtl (conhecida como *law of the wall*), onde  $u_* = \sqrt{\tau_w/\rho}$  é a velocidade de atrito,  $\tau_w$  é a tensão de corte da camada limite,  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $\kappa$  é a constante de von Kármán,  $z_0$  é a altura da rugosidade de velocidade nula, e  $u$  é a velocidade longitudinal em função da altura da corrente de densidade,  $z$ . A componente logarítmica atinge um valor equivalente à velocidade na superfície de um escoamento em superfície livre,  $u_{log m}$ , e densidade constante quando  $z$  tem valor superior à espessura da corrente (Figura 2.5) (Kneller et al., 1999).

No caso do limite superior difuso, a função da velocidade longitudinal é modelada como uma camada de densidade estratificada de espessura finita entre dois fluidos homogêneos. Este perfil pode aproximar-se a uma distribuição gaussiana acumulativa dada por,

$$u_{y,w} = u_{log m} - (u_{log m} - u_{amb}) \left[ \int_0^\xi \varphi d\xi / \int_0^1 \varphi d\xi \right] \quad (2.5)$$

sendo  $\xi = y/h_c$ ,  $\varphi = e^{-[(\xi-\beta)/2\sigma^2]}$ ,  $\beta$  e  $\sigma$  funções moduladoras do perfil de densidade,  $h_c$  a espessura da corrente de densidade e  $u_{amb}$  a velocidade do fluido ambiente. A Figura 2.5 mostra o perfil vertical de velocidade longitudinal para correntes de regime lento, através da soma entre as equações (2.4) e (2.5) (detalhe em Kneller et al. (1999)).

### 2.3. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA DE CORRENTES DE DENSIDADE

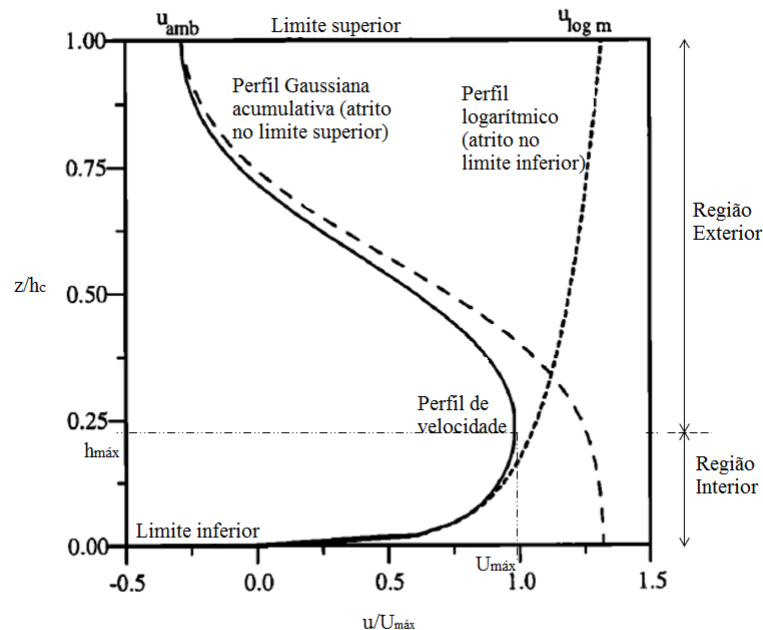


Figura 2.5: Perfil vertical de velocidade longitudinal (adaptado de Kneller et al. (1999)).

O perfil de velocidade longitudinal assemelha-se ao perfil de velocidade longitudinal de jatos de parede turbulentos, sendo estes utilizados como elementos de comparação nas investigações, devido ao facto de ambas sofrerem processos de interação entre o fluido e o leito, e entre os fluidos (Alves, 2008, p. 35; Gerber et al., 2011).

Como a corrente de densidade está sujeita a condições de contorno diferentes, a estrutura interna do fluxo apresenta grandezas escalares diferentes o que faz com que esta se divida em duas regiões a partir da velocidade máxima,  $U_{m\acute{a}x}$ . Assim, a estrutura de velocidade média da corrente é composta por uma região interna semelhante a uma camada limite turbulenta, que é caracterizada por apresentar velocidade nula e gradiente de velocidade positivo junto ao leito que decresce com a altura da corrente até ao nível da velocidade máxima, e uma região exterior que é caracterizada por ter um gradiente de velocidade negativo e velocidade nula junto à camada de mistura (Alves, 2008, p. 35; Meiburg e Kneller, 2010). A altura da velocidade máxima é controlada pela razão entre a força de arrasto atuante no limite superior e no limite inferior, ou seja, quando a resistência de arrasto na interface é superior à do fundo, a altura da velocidade máxima tende a aumentar e o gradiente de velocidade junto ao fundo diminui (Kneller e Buckee, 2000).

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Geralmente, os perfis de velocidade longitudinais de estudos laboratoriais apresentam uma região com velocidade longitudinal negativa correspondente ao fluido ambiente. Este fluxo de retorno surge devido aos efeitos de difusão viscosa e do arrastamento turbulento ao longo da interface. A sua magnitude aumenta com o aumento da altura da velocidade máxima (Pawlak e Armi, 2000; Gerber, 2008).

Na Figura 2.6 apresenta-se três tipos de perfil de concentração normalizado sobrepostos por um perfil de velocidade longitudinal típico, propostos por Kneller e Buckee (2000). O caso a) representa um exemplo de uma corrente de densidade fracamente estratificada. Este é dividido em duas regiões, uma região junto ao leito com uma zona densa de espessura constante e uma região mais dissolvida. Correntes de turbidez compostas maioritariamente por partículas grosseiras, em que estas depositam-se rapidamente são um exemplo deste tipo de perfil. O caso b) apresenta um gradiente de densidade elevado próximo do leito, diminuindo rapidamente em torno do nível de velocidade máxima. Este perfil é típico de correntes salinas e de correntes de turbidez composta com uma alta concentração de partículas finas, em que o processo de deposição ocorre lentamente. No caso c) observa-se uma zona de elevada concentração junto ao leito de pequena espessura, seguido de uma diminuição linear. Este tipo de perfil é característico de correntes com elevada taxa de arrastamento junto ao leito, típico de fluxos com uma forte erosão.

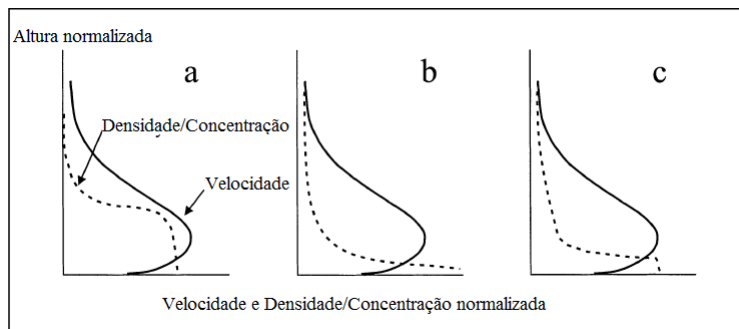


Figura 2.6: Perfil vertical de densidade/concentração (adaptado de Kneller e Buckee (2000)).

A partir dos perfis verticais é possível obter parâmetros de normalização característicos da corrente de densidade facilitando a comparação dos resultados obtidos com os resultados existentes. Na Tabela 2.1 apresenta-se os parâmetros mais utilizados e a respetiva definição.

Nogueira et al. (2012) estudaram a influência da irregularidade do leito sobre a dinâmica de uma corrente de densidade instável. A experiência laboratorial consistia em libertar

### 2.3. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA DE CORRENTES DE DENSIDADE

Tabela 2.1: Parâmetros de normalização característicos da corrente de densidade.

Parâmetros	Definição
Velocidade média da corrente de densidade	$U_d = \int_0^\infty u^2 dz / \int_0^\infty u dz$
Altura média da corrente de densidade	$h_d = \int_0^\infty u dz / U_d$
Velocidade máxima da corrente de densidade	$U_{máx}$
Altura em que a velocidade é metade da velocidade máxima	$z_{1/2} (z_{1/2} > z(U_{máx}))$
Espessura total da corrente de densidade	$h_c$
Excesso de massa volúmica médio da corrente de densidade	$\langle \Delta\rho \rangle_d = \int_0^\infty u \Delta\rho dz / (U_d h_d)$
Excesso de massa volúmica máximo da corrente de densidade	$\langle \Delta\rho \rangle_{máx}$

um volume finito de uma solução salina sobre um fluido ambiente em repouso, através de um mecanismos de libertação do bloqueio, e medição de velocidades instantâneas bidimensionais com recurso ao equipamento *particle image velocimetry* (PIV). Com base nos perfis de velocidade longitudinal observou uma redução de velocidade com o aumento da irregularidade do leito, possivelmente associado ao aumento da velocidade de atrito.

Gray et al. (2005) investigaram através de uma experiência laboratorial o impacto da variação da inclinação do leito na estrutura interna da corrente de densidade. Foram realizadas medições de velocidade longitudinal e vertical em três zonas distintas, com recurso ao equipamento *ultrasonic doppler velocity profiler* (UDVP), ao corpo de uma corrente de densidade *quasi*-permanente alimentada pelo um sistema de abastecimento. A zona A era composta por um fundo com inclinação, seguindo-se a zona B que representava a zona de quebra de inclinação e por fim a zona C de fundo horizontal. Com base nos perfis verticais da velocidade longitudinal observaram que a altura da velocidade máxima aumenta sempre para jusante independentemente do ângulo do declive na zona A, que existe uma tendência de aumento da espessura da corrente e diminuição da velocidade longitudinal para jusante. Na zona A, a altura normalizada da velocidade máxima aumenta com o aumento da inclinação e na zona C esta tende a diminuir com o aumento da inclinação na zona A.

Sequeiros et al. (2010) estudaram com base em perfis verticais de velocidade e densidade, a influência da interação entre a corrente e o leito e entre a corrente e o fluido ambiente. Ilustram várias experiências de correntes de densidade salinas e/ou correntes de turbidez de regime lento e regime rápido. Comparativamente com correntes lentas, a altura da velocidade máxima ocorre próxima do leito em correntes rápidas verificando-se que o reduzido arrastamento do fluido ambiente, característico de correntes rápidas, não é suficientemente elevado para compensar a resistência de atrito imposta pelo fundo.

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Observaram que fluxos de regime rápido exibem perfis de densidade que declinam suavemente no sentido ascendente, e que no caso de fluxos de regime lento os perfis tendem a ser constante até um ponto próximo da interface, logo correntes lentas são caracterizadas por apresentarem homogeneidade elevada perto do leito e uma interface nítida em comparação com correntes rápidas. Com o decorrer da experiência o leito desenvolveu ondulações provocadas pela corrente de densidade que influenciaram significativamente a estrutura interna de correntes rápidas. Foi visível um aumento da altura da velocidade máxima e os perfis de densidade apresentam uma estrutura uniforme numa zona próxima do leito.

Buckee et al. (2001) realizaram uma série de experiências com o intuito de investigar os efeitos provocados pela diferença de densidade, de inclinação, do regime do escoamento e da rugosidade do leito sobre a dinâmica de correntes de gravidade. Através da utilização do equipamento *laser Doppler anemometry* (LDA) para medição das velocidades instantâneas bidimensionais e de uma sonda de condutividade para medição da densidade, descreve qualitativamente e quantitativamente a estrutura turbulenta com base em perfis verticais de velocidade e densidade. Observaram que em ambos os regimes as correntes são estratificadas, com uma camada basal densa e gradiente de densidade elevado na região interior e uma diminuição repentina do gradiente de densidade ao nível da velocidade máxima. No caso do perfil de velocidade longitudinal o seu desenvolvimento é semelhante em ambos os regimes apresentando altura da velocidade máxima próxima do leito em correntes rápidas. O perfil de velocidades verticais tem magnitude inferior à velocidade longitudinal e uma distribuição vertical irregular.

### 2.3.3 Estrutura turbulenta de correntes de densidade

A quantificação da magnitude dos turbilhões manifestados através de flutuações de velocidade e de densidade é uma medida de intensidade de turbulência (Buckee et al., 2001). A turbulência pode ser originada e mantida pelo elevado gradiente de densidade, ou pelo elevado gradiente de velocidade. Existem vários métodos para quantificar a turbulência numa corrente de densidade, nomeadamente determinação da estabilidade da estratificação e das tensões impostas no fundo e na interface e quantificação da energia cinética turbulenta (ECT).

Correntes de densidade são fluxos estratificados e a estabilidade da estratificação afeta a turbulência. Mas o termo estratificação deve ser utilizado cuidadosamente, porque a corrente pode apresentar uma estratificação estável na camada de mistura, o que não implica necessariamente que no limite inferior a estratificação seja estável, o que possibilita a origem de comportamentos distintos em diferentes regiões do fluxo (Buckee



### 2.3. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA DE CORRENTES DE DENSIDADE

et al., 2001; Felix, 2002). Ou seja, numa estrutura que apresente uma estratificação estável na interface o movimento turbulento é atenuado e a turbulência dissipa rapidamente, a menos que haja uma fonte de energia externa, tal como a resistência devido ao atrito (Buckee et al., 2001).

A partir da quantificação da estabilidade da estratificação do fluxo é possível determinar se o gradiente de densidade é responsável pela turbulência da corrente de densidade (Gerber et al., 2011). O gradiente do número de Richardson,  $Rig$ , é um parâmetro utilizado para quantificar a estabilidade do fluxo localmente, possibilitando descrever quais as regiões que apresentam estratificação instável. É uma relação adimensional entre a produção (ou dissipação) de turbulência de flutuação e a quantidade de turbulência de viscosidade (Sequeiros et al., 2010),

$$Rig = -\frac{g}{\rho_a} \frac{\partial \rho / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (2.6)$$

Se o arrastamento exercido pela interface de densidade é suficientemente grande para fazer com que  $Rig < 0.25$ , as instabilidades de Kelvin-Helmholtz intensificam-se elevando os processos de mistura turbulenta (Sequeiros et al., 2010). Caso  $Rig > 0.25$ , significa que a energia produzida por arrastamento é superior, originando um elevado gradiente de densidade o que irá inibir a mistura vertical. Em alguns casos a turbulência pode persistir até  $Rig \approx 1$ , e posteriormente um regime laminar (Buckee et al., 2001; Sequeiros et al., 2010).

Gerber et al. (2011) através do equipamento *particle image velocimetry scalar* (PIV-S) mediram velocidade e densidade instantâneas de corrente de densidade *quasi*-permanente em regime rápido. Verificaram que a corrente de densidade apresenta maioritariamente  $Rig$  maior que o valor crítico, sendo que ao nível da velocidade máxima  $Rig > 1$  o que significa que nessa região a intensidade da turbulência é baixa. Esta região de baixa turbulência impede a troca de mistura justificando  $Rig < 0.25$  próximo do nível de velocidade máxima.

Sequeiros et al. (2010) observaram que  $Rig < 0.25$  perto do leito, sendo que este valor tende a aumentar com a diminuição do número de Richardson. Na interface  $Rig$  foi sempre maior que o valor crítico em correntes de regime lento, o que implica uma mistura amortecida. A forma global dos perfis estão de acordo com os observados por Buckee et al. (2001).

Uma vasta gama de parâmetros indicadores da intensidade de turbulência pode ser calculada em função da média de Reynolds. Tensão tangenciais de Reynolds ( $-\overline{\rho u'w'}$ ), tensão normal longitudinal de Reynolds ( $-\overline{\rho u'^2}$ ) e tensão normal vertical

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

de Reynolds ( $-\overline{\rho w'^2}$ ) são exemplos de parâmetros que refletem as tensões impostas sobre o fluxo médio pelas velocidades de flutuação. As tensões de corte produzem um aumento da velocidade de atrito e consequente desaceleração do fluido (Gray et al., 2005).

Kneller et al. (1999) estudaram a estrutura turbulenta da cabeça de uma corrente de densidade com regime lento, de volume finito originada pelo mecanismo de libertação de bloqueio. Aplicaram a decomposição de Reynolds para determinar as intensidades turbulentas originadas pelas velocidades de flutuação através da medição de velocidades instantâneas bidimensionais com recurso ao equipamento LDA. Na Figura 2.7 apresenta-se a distribuição das tensões de Reynolds na cabeça da corrente estudada. Esta é caracterizada por apresentar uma distribuição irregular, onde existem duas regiões significativas de tensões negativas e positivas máximas, uma no interior da camada de mistura que está relacionada com arrastamento do fluido ambiente através das instabilidades de Kelvin-Helmholtz e outra na região interior abaixo do nariz da corrente, atribuído ao arrastamento do excesso de fluido ambiente para o interior da cabeça, tornando-se num fluido flutuante.

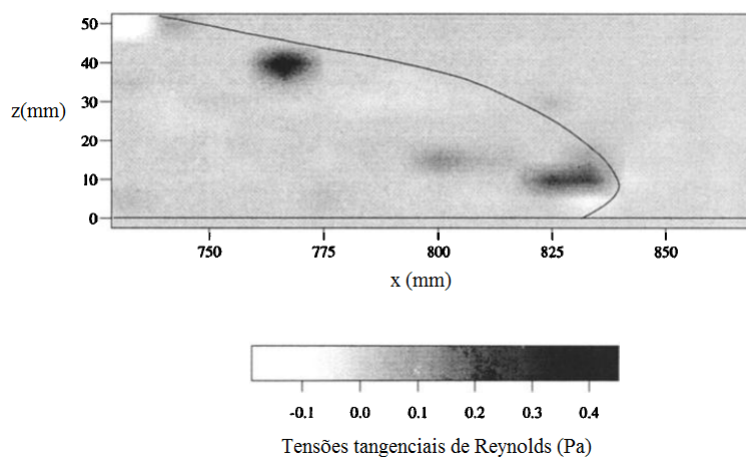


Figura 2.7: Representação da distribuição das tensões tangenciais de Reynolds na cabeça (adaptado de Kneller et al. (1999)).

Buckee et al. (2001) observaram que independentemente do regime que a corrente apresente existe um valor máximo positivo de tensão de corte junto ao leito que decresce com a altura. No caso das correntes de regime lento existe um valor negativo na região exterior possivelmente relacionado com a intensidade de mistura na camada de mistura.

Gray et al. (2005) observaram tensões de Reynolds aproximadamente nulas na região próximo do nível de velocidade máxima e valores negativos na região exterior. Com o avanço da corrente as tensões de Reynolds negativas aumentam de magnitude.

### 2.3. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA DE CORRENTES DE DENSIDADE

Relativamente às velocidades longitudinal e vertical de turbulência, Buckee et al. (2001) observaram que junto ao leito ocorrem elevadas magnitudes de intensidade turbulenta longitudinal em ambos os regimes, no entanto em correntes com regime rápido o valor máximo ocorre na camada de mistura. Ao nível da velocidade máxima a intensidade longitudinal apresenta valores próximos de zero. Verificaram que a intensidade longitudinal e vertical apresenta propriedades diferentes, o que indica que a corrente é anisotrópica. Gerber et al. (2011) também observaram diferenças entre o perfil de intensidade longitudinal e vertical, que estão associadas à anisotropia do transporte de movimento turbulento no interior causado pela estratificação do fluxo e pela tensão de corte no leito e na camada de mistura.

A partir das instabilidades de turbulência é possível contabilizar a ECT recorrendo à definição,

$$T_{ke} = \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2 + w'^2} \right) \quad (2.7)$$

onde  $u'$  e  $w'$  é a flutuação turbulenta longitudinal e vertical, respetivamente. A ECT por unidade de massa reflete a distribuição vertical de energia total do fluxo (Gray et al., 2005).

Buckee et al. (2001) observaram que em ambos os regimes a ECT tem valor elevado junto ao leito, sendo que em correntes rápidas o valor máximo de ECT ocorre na região exterior. Ao nível da velocidade máxima a ECT é mínima. Gray et al. (2005) verificaram que a ECT apresenta valores elevados na região exterior, diminuindo para jusante. No caso em que a zona A apresenta uma inclinação mais acentuada a produção de turbulência líquida devido às intensidades turbulentas longitudinal aumenta o que indica maior transferência de energia. Na zona B a desaceleração longitudinal da corrente contribui para a produção de turbulência em inclinações elevadas na zona A. Logo, o aumento da transferência de energia obtido a partir do fluxo numa inclinação mais acentuada é reforçado em função da rapidez de desaceleração causando produção de turbulência devido à ação da intensidade turbulenta longitudinal.

Uma região ao nível da velocidade máxima com intensidade de turbulência baixa, designada por zona de difusão lenta (ZDL), foi vista por todos os autores. Segundo Buckee et al. (2001) existem duas explicações possíveis para a ocorrência deste fenómeno: 1) fraca produção por arrastamento devido à baixa magnitude das tensões de Reynolds e gradiente de velocidade longitudinal nulo; 2) devido à força de estratificação originada por um forte gradiente de densidade, que pode ser suficiente para dissipar a turbulência. A existência da ZDL provavelmente irá retardar o transporte de massa na região inferior

## *CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA*

da corrente, o que provoca uma concentração de partículas arrastadas pelo leito na região interior e uma redução da queda de mistura de baixa densidade do fluido ambiente arrastado no limite superior da corrente.

Felix (2002) compara perfis de velocidade, concentração e ECT de correntes salinas (CS), correntes de turbidez compostas por partículas finas (CTF) e correntes de turbidez compostas por partículas grosseiras (CTG), obtidos através de modelação numérica bidimensional (Figura 2.8). No caso da CTG o perfil de velocidades apresenta um gradiente de velocidade horizontal menor, originado pelo aumento da velocidade de sedimentação. Devido à elevada concentração das partículas grosseiras no leito a densidade e a velocidade ao longo de um estreito intervalo vertical aumentam, o que origina um gradiente de velocidade vertical elevado, ao contrário das CS e CTF que devido à intensa mistura turbulenta o gradiente de velocidade vertical é menor. Relativamente à altura da velocidade máxima, esta encontra-se próxima do leito no caso das CTG, devido à rápida deposição das partículas. Observou que ECT tem valor máximo próximo do leito resultante da elevada produção, e um valor mínimo em torno da altura da velocidade máxima, adquirindo um aumento local de ECT, situada à altura de inflexão do gradiente no perfil de velocidade, onde existe maior arrastamento. Felix (2002) acredita que diminuição da ECT na altura de velocidade máxima resulta do reduzido arrastamento, logo menor produção de turbulência. No caso das CTG a diminuição de ECT é pequena devido à menor estratificação.

Com base nos resultados obtidos, Felix (2002) afirma que existe uma interação clara entre a turbulência, a velocidade e a concentração (Figura 2.9). Observou que correntes com elevada concentração resultam num aumento de aceleração, logo a concentração determinada diretamente a magnitude da velocidade. Relativamente à distribuição da dimensão das partículas, esta irá influenciar a forma do perfil, isto é, fluxo que possuem maior dimensão das partículas tendem a aproximar o nível de velocidade máxima do leito. No caso do perfil de velocidade longitudinal, a forma do perfil irá determinar a produção de turbulência por atrito, ou seja, elevado gradiente de velocidade gera elevada produção por arrastamento. Por sua vez, o nível de turbulência influencia a velocidade através da troca de quantidade de movimento. A turbulência mantém sedimentos em suspensão ao longo do fluxo, influenciando o perfil de concentração. Em contrapartida a distribuição uniforme de densidade conduz a estratificação estável o que irá amortecer a turbulência e se for suficientemente estável, irá anular a turbulência.

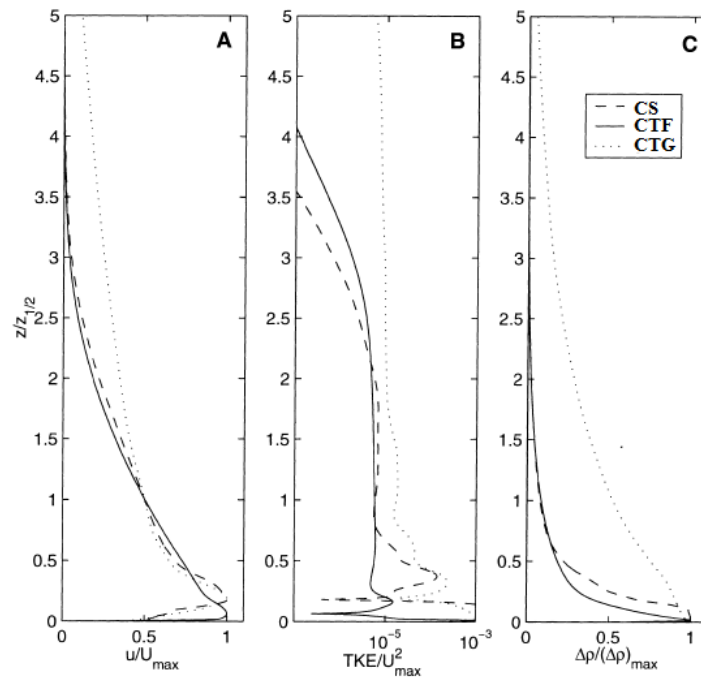


Figura 2.8: Comparação entre corrente salina, corrente turbidez com partículas finas e corrente de turbidez com partículas grosseiras: A) perfil vertical de velocidade longitudinal; B) perfil vertical da energia cinética turbulenta; C) perfil vertical de concentração (adaptado de Felix (2002)).

## 2.4 Modelação Matemática

### 2.4.1 Enquadramento

Estudos de campo de correntes de densidade apresentam um elevado grau de dificuldade devido ao seu desenvolvimento complexo e inesperado, sendo necessário a aplicação de metodologias alternativas, tais como experiências laboratoriais e modelação matemática, na investigação e compreensão da estrutura turbulenta de correntes de densidade (Gerber et al., 2011; An et al., 2012).

A modelação numérica consiste numa ferramenta de carácter estatístico e implica uma correta derivação das equações de base que regem o escoamento. Estudos baseados neste método possibilitam a determinação de vários parâmetros importantes da dinâmica da corrente de densidade (velocidade de propagação, espessura da corrente, o efeito da diferença de densidades sobre a velocidade de propagação são exemplo de parâmetros característicos de correntes de densidade), permitindo uma investigação dos mecanismos desenvolvidos durante a sua evolução (An et al., 2012).

Correntes de densidade são caracterizadas por apresentarem uma camada de mistura de

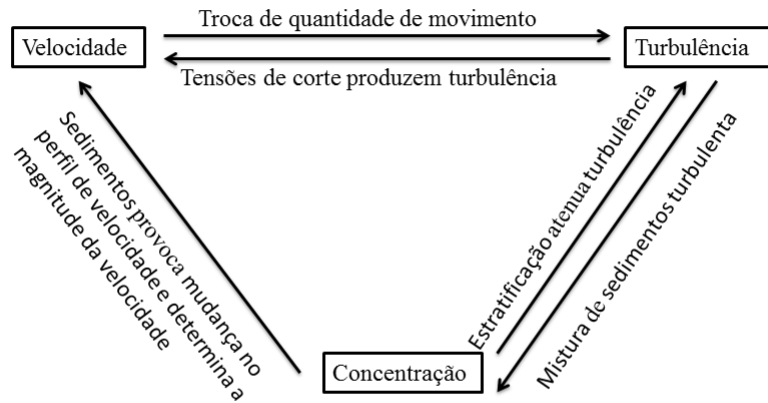


Figura 2.9: Interação entre turbulência, velocidade e concentração (adaptado de Felix (2002)).

elevada turbulência originada pela diferença de densidade entre a corrente de densidade e o fluido ambiente. Este fenómeno provoca uma alteração espacial e temporal da densidade do escoamento, o que implica que para além da combinação da equação de conservação da massa global e da equação da conservação da quantidade de movimento é necessário adicionar termos da equação de transporte da substância que confere o excesso de densidade. Estes são definidos com base na causa que origina a diferença de densidade, isto é, no caso em que a diferença é provocado pela variação de temperatura será incluído termos da equação de transporte de calor, no caso em que a diferença é originada pela heterogeneidade da composição da mistura, por exemplo correntes salinas, será incluído termos da equação de transporte para fração de massa (ou volume) (Gerber, 2008, p. 110-111; Gerber et al., 2011).

Correntes de densidade também são conhecidas por serem um fluxo estratificado e estarem sujeitas a condições anisotrópicas causadas pela troca de massa entre os fluidos e pela própria estratificação, o que significa que os modelos numéricos devem ter a capacidade de descrever o escoamento sob estas condições. Inicialmente foram desenvolvidos modelos baseados na média segundo a profundidade das variáveis instantâneas, em que se admitia que as correntes de densidade eram similares ao longo do tempo. Este modelo numérico torna-se inconveniente quando, por exemplo, são impostas alterações da composição do leito que poderão originar alteração das

propriedades da corrente (Gerber, 2008, p. 110-111).

Na engenharia fluvial existem vários métodos de análise para os escoamentos turbulentos. Segundo Gerber (2008, p. 110-111) a aplicação da média de Reynolds às equações hidrodinâmicas constitui a técnica mais indicada em estudos de correntes de densidade. A aplicação da média de Reynolds às variáveis instantâneas consiste na seleção das menores escalas de turbilhões e incorporação de equações adicionais de fecho, que tem em conta o efeito dessas pequenas escalas sobre o escoamento médio temporal. Assim as equações apresentam as soluções expressas em campo médio temporal de pressão e velocidade (Ferreira et al., 2010), tornando as equações hidrodinâmicas gerais.

Nesta dissertação serão estudados os efeitos originados pela alteração do leito sobre a corrente de densidade. Será adotado a metodologia de dupla média (*Double-average methodology* na literatura inglesa) que consiste na derivação de equações hidrodinâmicas médias no tempo e no espaço. Esta metodologia é aplicada em estudos escoamentos em superfície livre sobre fronteira rugosa ou sujeitos a vegetações densas, e proporciona um conhecimento detalhado da hidrodinâmica do escoamento com fronteira rugosa heterogênea (Ferreira et al., 2010).

#### 2.4.2 Equações hidrodinâmicas

Na presente dissertação serão aplicadas técnicas de análise que possibilita a descrição da estrutura turbulenta de correntes de densidade com base na aplicação de operadores de média espacial e temporal.

Ao contrário das correntes de turbidez não conservativas, em que é necessário estudar os mecanismos de sedimentação, deposição e erosão, o formalismo matemático de correntes salinas apresenta um grau de complexidade menor (An et al., 2012).

Optou-se por inicialmente escrever as equações hidrodinâmicas para cada elemento da composição da corrente de densidade e posteriormente a sua combinação. Para uma corrente salina, as equações hidrodinâmicas que descrevem o escoamento de fluidos newtonianos, utilizando a notação tensorial, são descritas da seguinte forma,

Equação de conservação da massa

$$\frac{\partial \rho^{(w)}}{\partial t} + \frac{\partial \rho^{(w)} u_i^{(w)}}{\partial x_i} = 0, \text{ (Fração da água ambiente)} \quad (2.8a)$$

$$\frac{\partial \rho^{(s)}}{\partial t} + \frac{\partial \rho^{(s)} u_i^{(s)}}{\partial x_i} = 0, \text{ (Fração do sal)} \quad (2.8b)$$

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Equação de conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial u_j^{(w)} \rho^{(w)}}{\partial t} + \frac{\partial u_j^{(w)} u_i^{(w)} \rho^{(w)}}{\partial x_i} = \frac{\partial \sigma_{ij}^{(w)}}{\partial x_i} + \rho^{(w)} g_j, \text{ (Fração da água ambiente)} \quad (2.9a)$$

$$\frac{\partial u_j^{(s)} \rho^{(s)}}{\partial t} + \frac{\partial u_j^{(s)} u_i^{(s)} \rho^{(s)}}{\partial x_i} = \frac{\partial \sigma_{ij}^{(s)}}{\partial x_i} + \underbrace{\rho^{(s)} g_j - \rho^{(w)} g_j}_{\text{Termo I}}, \text{ (Fração do sal)} \quad (2.9b)$$

onde  $(w)$  e  $(s)$  representam o tipo de espécie, água e sal respetivamente;  $t$  a variável tempo;  $x_i$  a variável espaço segundo a direção  $i$ ;  $\rho$  a massa volúmica;  $u_i$  a velocidade segundo a direção  $i$ ;  $\sigma_{ij}$  o tensor das tensões;  $g_j$  a componente de aceleração gravítica na direção  $j$ ;  $i$  e  $j$  a componente da direção que tomam 1, 2 e 3 como valores. O sistema de coordenadas adotado foi o sistema de coordenadas cartesiano definido por  $(x, y, z)$ , onde  $x$  é a componente longitudinal,  $y$  é a componente transversal e  $z$  é a componente vertical. Para este tipo de sistema de coordenadas as componentes de velocidade são  $u_i = (u, v, w)$ .

Os termos do lado esquerdo das equações (2.9a) e (2.9b) correspondem à taxa de variação do movimento por unidade de volume do fluido, sendo o primeiro termo a aceleração local e o segundo termo a aceleração convectiva escrita na forma conservativa de modo a facilitar a combinação das equações. O lado direito das equações corresponde às forças externas que atuam sobre o fluido, isto é, forças responsáveis pela aceleração do fluido, onde o primeiro termo é a força de contacto (de pressão e viscosas) que atua na superfície, e o segundo termo é a força de gravidade que atua na massa do fluido (Ricardo, 2008, p. 6-7). Como o sal encontra-se dissolvido não sofrerá forças de contacto, logo o primeiro termo do lado esquerdo da equação (2.9b) é nulo. O termo I da equação (2.9b) corresponde à força de gravidade que atua na massa do sal e à força de flutuação exercida pela água sobre o sal.

Para definir a concentração de massa num determinado local, é aplicado um operador média espacial aos termos das equações para um volume infinitesimal, contendo no entanto massa suficiente de ambas as espécies, água e sal. É importante referir que os termos diferenciais não comutam devido à existência de duas espécies distintas, isto é,

$$\left[ \frac{\partial \theta}{\partial f} \right] \neq \frac{\partial [\theta]}{\partial f} \quad (2.10)$$

sendo  $\theta$  uma variável genérica do escoamento (velocidade e pressão) e  $f$  é a coordenada espacial e temporal. Para resolver o problema é utilizado os seguintes teoremas:



Teorema da média espacial

$$\left[ \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right] = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi [\theta]}{\partial x_j} - \frac{1}{V_f^*} \int_{S_{int}^*} \theta n_j^* dS \quad (2.11)$$

Equação geral de transporte

$$\left[ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi [\theta]}{\partial t} + \frac{1}{V_f^*} \int_{S_{int}^*} \theta u_i^{*(I)} n_j^* dS \quad (2.12)$$

$\varphi$  é a função que expressa a concentração da massa da espécie, ou seja, para a componente de sal  $\varphi = c$ , onde  $c$  é a concentração do sal, e para a componente de água  $\varphi = (1 - c)$ ,  $V_f^*$  é o volume infinitesimal do fluxo,  $S_{int}^*$  é a superfície de interface entre o sal e a água,  $n_i^*$  é a componente  $i$  do vetor unitário normal à interface sal/água dirigido do sal para a água e  $u_i^{*(I)}$  é a velocidade na interface sal/água segundo a direção  $i$  (Ferreira et al., 2010).

Após a aplicação do operador média espacial, da combinação das equações hidrodinâmicas e considerando que  $[\theta] = \theta$ , as equações hidrodinâmicas que descrevem o escoamento de fluidos newtonianos e incompressíveis é dada por (detalhe no Anexo A)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2.13a)$$

$$\frac{\partial u_j \rho^m}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j \rho^m}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho^{(w)}} \frac{\partial(1-c)p}{\partial x_j} + (1-c)\nu^{(w)} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + (\rho^m - c\rho^w)g_j, \quad (2.13b)$$

É importante referir que não será desenvolvido os termos da equação de transporte, sendo necessário realizar uma combinação de equações que possibilitem a determinação das variáveis que descrevem o escoamento, por exemplo as equações (2.8a), (2.13a) e (2.13b).

### 2.4.3 Metodologia dupla média

Na maioria dos estudos de fluxos sobre fronteira hidráulica, a estrutura do fluxo é geralmente descrita pelas variáveis médias temporais das equações hidrodinâmicas através da aplicação da média de Reynolds (*Reynolds-averaged* na literatura inglesa) (Nikora et al., 2007, 2013).

Quando o leito apresenta uma fronteira irregular com grande influência na produção de turbulência e na resistência ao escoamento, equações hidrodinâmicas médias temporais não são suficientes para caracterizar o escoamento médio temporal e a resistência ao

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

escoamento devido à elevada heterogeneidade perto do leito originada pelos elementos rugosos (Nikora et al., 2007; Ferreira et al., 2010).

Para caracterizar a resistência ao escoamento seria necessário relacionar os parâmetros médios no espaço que descrevem o leito e as propriedades locais fornecidas pelas médias temporais, tornando as equações hidrodinâmicas médias no espaço e tempo impraticáveis e inconvenientes devido à complexidade do leito (Nikora et al., 2001, 2007; Coleman et al., 2008).

A metodologia da dupla média (DAM) permite descrever o escoamento sobre leito através da aplicação da média temporal e espacial aos termos das equações hidrodinâmicas (Ricardo, 2008, p. 10-11).

A equação de conservação de quantidade de movimento média no espaço e no tempo inclui termos que permitem o tratamento teórico da resistência ao escoamento através do termo de resistência de forma e resistência de viscosidade (*form drag*, *viscous drag* na literatura inglesa) e a quantificação da quantidade de movimento do escoamento heterogénea devido à rugosidade, através das tensões dispersivas (*form-induced stresses* na literatura inglesa). Esta inclusão dos termos de forma direta anula a necessidade da calibração das equações de resistência devido à interação entre o escoamento e os elementos sólidos do leito, através da inclusão dos termos nas equações hidrodinâmicas médias no tempo de forma *ad-hoc* (Ferreira et al., 2010; Nikora et al., 2007).

Na DAM as equações de conservação são expressas em quantidades médias no tempo e no espaço, sendo a última definida pela escalas de comprimento longitudinal, vertical e transversal dos elementos de rugosidade (Nikora et al., 2007, 2013; Coleman et al., 2008)

Segundo Nikora et al. (2013), a aplicação da abordagem da dupla média em estudos escoamentos em superfície livre sobre fronteira rugosa, tem as seguintes vantagens: i) definições rigorosas para fluxos de fronteira rugosa nomeadamente a uniformidade, bidimensionalidade e as tensões de corte do leito; ii) consistência entre parâmetros de média espacial, tensão de corte do leito e variáveis dupla média do fluxo; iii) contabilidade explícita para a resistência de forma, resistência viscosa, tensões dispersivas e fluxos de substâncias como resultado da derivação rigorosa; iv) considerações de escala e parametrização com base em duas variáveis médias; v) possibilidade do relacionamento rigoroso dos parâmetros de rugosidade e propriedades do fluxo.

A DAM pode ser aplicada de três formas: i) média espaço-tempo, em simultâneo; ii) média tempo-espaço consecutiva; iii) média espaço-tempo consecutiva. Segundo Nikora

et al. (2007) a escolha do procedimento origina equações hidrodinâmicas de dupla-média diferentes, que poderão ter implicações na modelação do escoamento. Nesta dissertação, será aplicado a média tempo-espaço consecutiva, por ser composta por um procedimento simples e intuitivo, e ser o mais adequado para descrever escoamentos com leito rugoso hidrodinâmico (Nikora et al., 2007).

A metodologia da dupla média tempo-espaço consecutiva inclui dois processos: 1) Equação de conservação média no tempo, através da utilização da decomposição de Reynolds nas variáveis instantâneas, seguido de aplicação do procedimento da média no tempo para cada termo da equação; 2) Equação de conservação da dupla média utilizando a decomposição das variáveis médias no tempo em dupla média das variáveis e perturbações espaciais locais, seguindo da aplicação do operador média no espaço em cada termo da equação (Nikora et al., 2007, 2013; Coleman et al., 2008).

As equações hidrodinâmicas médias no tempo são derivadas a partir da aplicação do conceito da decomposição de Reynolds, que é um conceito ideal para resolver fluxos turbulentos. Este conceito separa a variável instantânea em duas componentes e pode ser escrita da seguinte forma:

$$\theta(x, y, z, t) = \bar{\theta}(x, y, z) + \theta'(x, y, z, t) \quad (2.14)$$

$\theta(x, y, z, t)$  representa o valor instantâneo de uma variável genérica,  $\bar{\theta}(x, y, z)$  representa o valor médio no tempo e  $\theta'(x, y, z, t)$  representa a flutuação temporal.

Antes de perseguir com a derivação das equações hidrodinâmicas são estabelecidas simplificações:

- i) Como o caso em estudo apresenta uma concentração de sal muito baixa, admite-se que está é desprezável logo  $(1 - c) \simeq 1$  e por conseguinte  $c \simeq 0$ ;
- ii) Irá ser assumido que a mistura é diluída, contém apenas densidade de referência constante (Gerber, 2008, p. 119-120).

Imposto as simplificações, a equação (2.13b) é descrita da seguinte forma,

$$\rho^m \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho^m \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho^{(w)}} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu^{(w)} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + \rho^m g_j \quad (2.15)$$

O segundo termo do lado esquerdo da equação (2.15) está escrito de forma conservativa.

O operador médio no tempo obedece às seguintes regras:

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

$$\begin{aligned}\overline{\overline{\theta_1}} &= \overline{\theta_1}; & \overline{\overline{\theta_1 + \theta_2}} &= \overline{\theta_1} + \overline{\theta_2}; & \overline{\overline{\theta_1 \theta_2}} &= \overline{\theta_1 \theta_2} \\ \frac{\partial \overline{\theta_1}}{\partial f} &= \frac{\partial \overline{\theta_1}}{\partial f}; & \overline{\overline{\theta_1 \theta_2}} &= \overline{\theta_1 \theta_2}; & \overline{\theta_1'} &= 0\end{aligned}$$

onde  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são variáveis genéricas,  $f$  coordenada espacial e temporal (Nikora et al., 2007).

Após a aplicação da decomposição de Reynolds às variáveis instantâneas, e do operador média temporal a equação de conservação de quantidade de movimento médio no tempo é descrito por,

$$\rho^m \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial t} + \rho^m \frac{\partial (\overline{u_j \overline{u_i}})}{\partial x_i} = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} \frac{1}{\rho^{(w)}} - \rho^m \frac{\partial \overline{u_j' u_i'}}{\partial x_i} + \nu^{(w)} \frac{\partial^2 \overline{u_j}}{\partial x_i \partial x_i} + \rho^m g_j \quad (2.16)$$

Com base na equação (2.15), verifica-se que após a aplicação do procedimento da média temporal surge um novo termo,  $\rho^m \overline{u_j' u_i'}$ , que representa o tensor das tensões de Reynolds. Este termo surge da não linearidade do termo da aceleração convectiva e traduz o efeito da flutuação da velocidade sobre o escoamento médio de transporte de quantidade de movimento (Ferreira et al., 2010).

A aplicação da média no espaço sobre a equação (2.16) é semelhante ao procedimento da média no tempo, onde é introduzido a decomposição espacial nas variáveis médias no tempo e posterior aplicação do operador médio espacial aos termos das equações. O conceito da decomposição espacial é idêntica à decomposição de Reynolds,

$$\overline{\theta}(x, y, z) = \langle \overline{\theta} \rangle(z) + \tilde{\theta}(x, y, z) \quad (2.17)$$

em que,  $\langle \overline{\theta} \rangle(z)$  representa a média dupla espacial e temporal a uma dada cota  $z$  e  $\tilde{\theta}(x, y, z)$  representa a flutuação espacial. Por conveniência de notação, usar-se-á  $\tilde{\theta}(x, y, z) = \tilde{\theta}(x, y, z)$  (Ferreira et al., 2010).

O operador médio espacial na região de escoamento acima das cristas de rugosidade segue as regras de Reynolds, ou seja (Nikora et al., 2007)

$$\begin{aligned}\langle \langle \theta_1 \rangle \rangle &= \langle \theta_1 \rangle; & \langle \langle \theta_1 \theta_2 \rangle \rangle &= \langle \theta_1 \rangle + \langle \theta_2 \rangle; & \langle \langle \theta_1 \theta_2 \rangle \rangle &= \langle \theta_1 \theta_2 \rangle \\ \left\langle \frac{\partial \theta_1}{\partial f} \right\rangle &= \frac{\partial \langle \theta_1 \rangle}{\partial f}; & \langle \theta_1 \theta_2 \rangle &= \langle \theta_1 \rangle \langle \theta_2 \rangle; & \langle \tilde{\theta}_1 \rangle &= 0\end{aligned}$$

Na região do escoamento abaixo das cristas o processo da média espacial não é trivial porque os operadores não comutam com a diferenciação temporal e espacial das variáveis devido à existência de sólido/líquido no volume controlado (Nikora et al., 2007), isto é,

$$\left\langle \frac{\partial \theta}{\partial f} \right\rangle \neq \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial f} \quad (2.18)$$

Isto implica que seja utilizado os teoremas (2.11) e (2.12) usados na derivação das equações hidrodinâmicas do fluxo. Como os conceitos de derivação não são iguais, algumas das variáveis não terão o mesmo significado. Ou seja,  $V_f^* = V_f$  é o volume controle do fluxo,  $S_{int}^* = S_{int}$  é a superfície de interface entre a parte sólida e a parte líquida do volume de controle,  $n_i^* = n_i$  é a componente  $i$  do vetor unitário normal à interface sólido/água dirigido da parte sólida para parte líquida,  $\varphi = \psi(z) = A_f(z)/A$  é a relação entre a área ocupada pelo fluido,  $A_f$ , e a área total do domínio de aplicação do operador média espacial,  $A$ , para uma dada cota  $z$  e  $u_i^{*(I)} = u_i^{(I)}$  é a velocidade na interface sólida/líquida segundo a direção  $i$ . Implementando a condição de não escorregamento, se a velocidade dos elementos sólidos for nula e a fronteira não porosa tem-se que  $u_i^{(I)} = 0$ , logo o último termo da equação é nulo (Ferreira et al., 2010).

Aplicando a decomposição espacial, para regime permanente e para elementos de rugosidade, obtêm-se a equação

$$\begin{aligned} \rho^m \frac{\partial \psi \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial t} + \rho^m \frac{\partial \psi \langle \bar{u}_j \rangle \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} + \rho^m \frac{\partial \psi \langle \tilde{u}_j \tilde{u}_i \rangle}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho^{(w)}} \frac{\partial \psi \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} \bar{p} n_j dS + \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \psi \left\langle \nu^{(w)} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right\rangle \right) - \frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} \nu^{(w)} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} n_i dS - \rho^m \frac{\partial \psi \langle \overline{u'_j u'_i} \rangle}{\partial x_i} + \rho^m g_j \end{aligned} \quad (2.19)$$

Os termos  $\psi \langle \overline{u'_j u'_i} \rangle$ ,  $\psi \langle \tilde{u}_j \tilde{u}_i \rangle$  e  $\psi \left\langle \nu^{(w)} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right\rangle$  representam as tensões de Reynolds, tensões dispersivas e as tensões viscosas. Os termos  $\frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} \bar{p} n_j dS$  e  $\frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} \nu^{(w)} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} n_i dS$  representam a força de resistência de forma e a força de resistência viscosa, respetivamente, por unidade de volume. As tensões viscosas e a força de resistência viscosas geralmente são desprezáveis (Ferreira et al., 2010).

A equação de conservação de massa média no espaço e no tempo, de acordo com o mesmo procedimento é descrita,

$$\frac{\partial \psi \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.20)$$

Correntes de densidade apresentam duas zonas de elevada turbulência, a zona A que situa-se junto ao leito e é originada pelo tipo de rugosidade e a zona B que localiza-se na interface dos fluidos e é provocada pela troca de massa entre a corrente de densidade e o fluido ambiente.

Na zona A, a definição de quantidade média espacial implícita na equação (2.17), é

## CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

$$\langle \bar{\theta} \rangle_A(z) = \frac{1}{A_f(z)} \int_{\Omega(\alpha,\beta)} \bar{\theta}(\alpha, \beta, z) dS \quad (2.21)$$

em que  $A_f$  representa a área ocupada pelo fluido,  $\Omega$  o domínio espacial, com dimensões superiores às escalas do espectro produtivo da turbulência, com área  $L_x \times L_y$ , no plano paralelo ao leito. As variáveis  $\alpha$  e  $\beta$  correspondem às coordenadas na direção  $x$  e  $y$ , respetivamente, e tomam valores entre  $0 < \alpha < L_x$  e  $0 < \beta < L_y$  (Franca et al., 2008; Ricardo, 2008, p. 15-16; Ferreira et al., 2010).

Na zona B, o operador médio no espaço e tempo é definido por,

$$\langle \bar{\theta} \rangle_B(t) = \frac{1}{T_f} \int_{T_0} \bar{\theta}(t) dT \quad (2.22)$$

sendo  $T_f$  o intervalo de tempo em que a variável  $\theta$  é uma propriedade da corrente de densidade e  $T_0$  o intervalo de tempo total.

O operador (2.21) será desenvolvido e aplicado às variáveis hidrodinâmicas no capítulo de análise de resultados. Em contrapartida o operador (2.22) não será estudado nesta dissertação, devido à falta de informação que possibilite definir correctamente a massa volúmica localmente.

## Capítulo 3

# Instalações laboratoriais e equipamentos de medição

### 3.1 Introdução

Nesta seção descrevem-se as instalações experimentais e os equipamentos utilizados para o trabalho experimental. Este foi realizado no Canal de Recirculação e Inclinação Variável (CRIV) localizado no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, e consiste na simulação física de uma corrente de densidade conservativa continuamente alimentada, originada pela intrusão de uma mistura salina num fluido ambiente em repouso com densidade inferior. Foram realizados quatro conjuntos de ensaios para duas densidades de mistura salina e dois tipos de leito permitindo uma análise cruzada dos resultados.

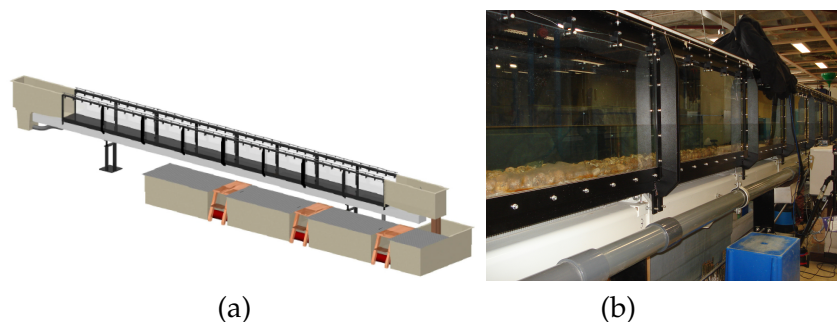


Figura 3.1: CRIV: a) vista geral (Ricardo, 2008, p. 41); b) pormenor.

A interpretação da dinâmica da corrente de densidade é realizada através da análise de perfis de velocidade e de tensões de Reynolds, obtidos com base nos dados experimentais dos campos de velocidades instantâneas medidos no corpo da corrente com recurso a um sistema não-intrusivo, o *Particle Image Velocimetry* (PIV).

### 3.2 Canal experimental

Na seção seguinte do texto descreve-se a instalação experimental onde foram realizados os ensaios, referindo-se as alterações realizadas no CRIV para a sua adaptação ao presente estudo. Posteriormente descrevem-se os equipamentos de medição necessários, quer à caracterização dos ensaios quer à medição das variáveis hidrodinâmicas (campo de velocidades) que permitem posteriormente a análise de resultados.

O CRIV é um canal prismático unidirecional de fundo liso em alumínio (Figura 3.2 a)), paredes laterais em vidro transparente (Figura 3.2 b)) e suportado por uma estrutura metálica regulável que possui um sistema motorizado permitindo variar o declive do canal entre  $-1/200$  e  $1/40$  (Figura 3.2 c)). Tem  $12.5\text{ m}$  de comprimento,  $40.9\text{ cm}$  de largura e  $50\text{ cm}$  de altura útil.

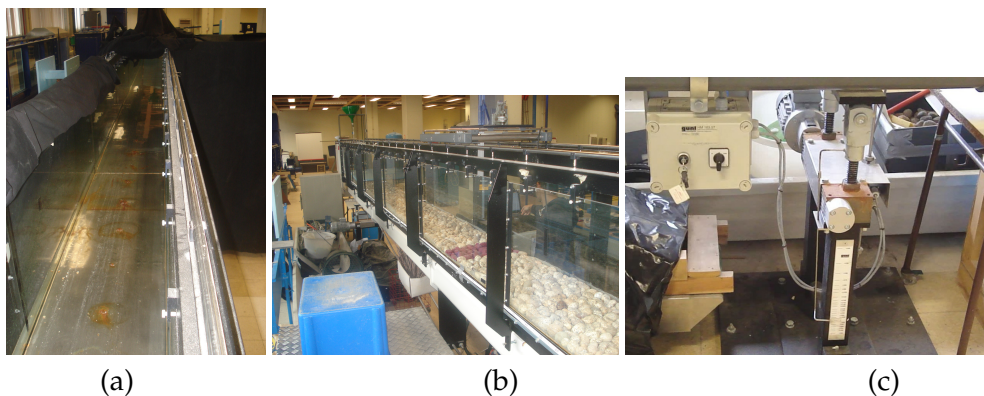


Figura 3.2: Elementos do CRIV: a) fundo liso em alumínio; b) parede lateral em vidro transparente; c) sistema de regularização da altura do canal.

O canal é composto por um circuito de recirculação que tem como elementos principais uma estrutura de entrada e saída, bomba centrífuga (encontra-se inativa no decorrer dos trabalhos experimentais), conduta em PVC de  $100\text{ mm}$  de diâmetro, caudalímetro eletromagnético, válvula a jusante e montante da bomba centrífuga e quatro tanques de inércia com capacidade de  $1.1\text{ m}^3$  cada, interligados por condutas em PVC.

O trabalho experimental consiste na simulação física de correntes de densidade permanentes, desenvolvendo-se no interior de uma massa de água em repouso (fluido ambiente). O canal apresenta elementos característicos de estudos de escoamento fluviais tendo sido necessário proceder a algumas alterações de forma a garantir as condições necessárias à realização dos ensaios. As modificações efetuadas foram: fecho da estrutura de saída do canal, fecho da conduta de ligação dos tanques e a instalação de um sistema



de alimentação do fluido com densidade adicional que originará a corrente de densidade a montante do canal. Após as alterações, a instalação experimental, esquematizada na Figura 3.3, é composta por:

- i) Canal unidirecional (tanque onde se encontra o fluido ambiente em repouso no início dos ensaios);
- ii) Sistema de alimentação;
- iii) Sistema de controlo de caudal a jusante do canal;
- iv) Três tanques de descarga;
- v) Um tanque de mistura.

O sistema de alimentação é constituído por uma bomba submersível *Einhell* (Figura 3.4 a)), modelo BG-SP250 com 250 W de potência e 6200 l/h de caudal nominal, que elevará a mistura salina através de uma tubagem flexível (mangueira do tipo *sprint*) até ao funil circular de plástico. Na saída do funil existe um tubo de plástico flexível com uma válvula que permite ajustar a vazão da entrada do fluido de densidade,  $\rho_i$ , no fluido ambiente,  $\rho_a$  (onde  $\rho_i > \rho_a$ ), fixado a uma calha metálica (Figura 3.4 b)). A jusante da calha metálica é colocado um estabilizador em poliestireno expandido de forma a anular alguma perturbação que possa ocorrer na superfície livre (Figura 3.4 c)) decorrente da introdução da mistura salina no fluido ambiente. A bomba submersível será colocada no tanque de mistura (Figura 3.5 a)) preenchido com mistura de água salina.

A drenagem do fluido é feita a jusante do canal, para um tanque de descarga (Figura 3.5 b)), através de um sistema de tubagem flexível e uma válvula colocada num dos dois orifícios existentes no fundo do canal (Figura 3.5 c)). No início será realizado um processo iterativo de ajustamento dos caudais *in* e *out*, para garantir que a altura da coluna de água permanece constante.

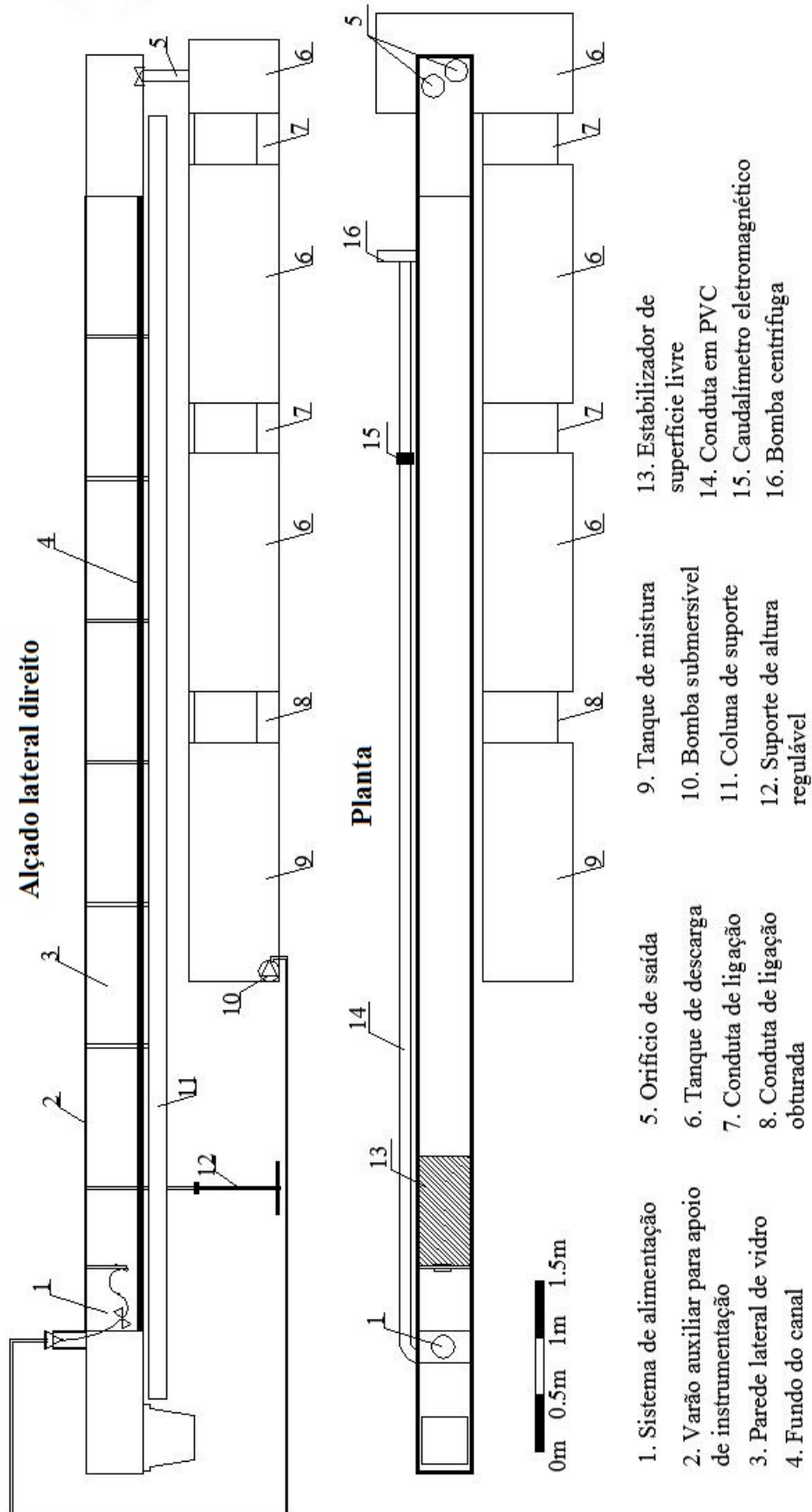


Figura 3.3: Esquema da instalação experimental.

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

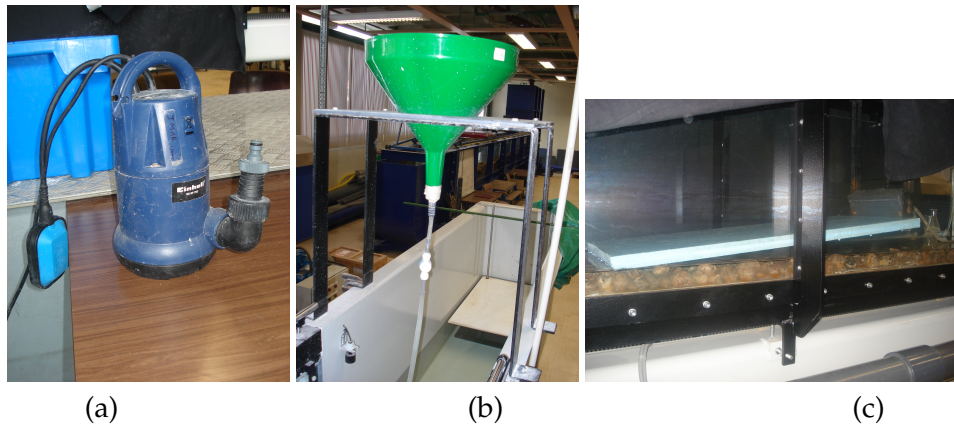


Figura 3.4: a) bomba submersível; b) funil circular, tubo de plástico fléxivel e válvula de seccionamento; c) calha metálica e estabilizador.

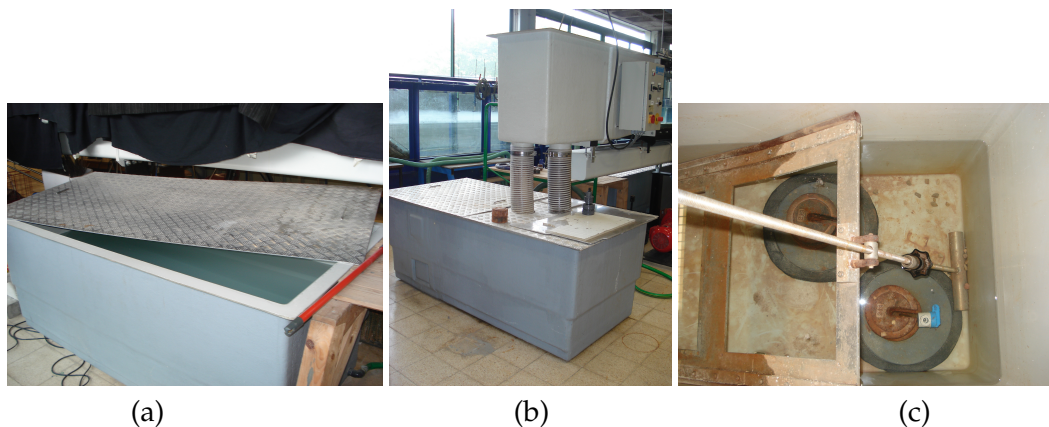


Figura 3.5: a) tanque de mistura; b) tanque de descarga; c) sistema de drenagem.

### 3.3 Caracterização do ensaio

A caracterização das condições do ensaio inclui a medição da massa volúmica da mistura salina que encontra-se no tanque de mistura, da altura da coluna de água e da topografia do leito.

A medição da massa volúmica foi realizada no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, com recurso a um picnómetro de vidro com volume comercial de 100 ml (Figura 3.6 a)) e uma balança de precisão com um erro de  $\pm 0.01$  g (Figura 3.6 b)). A altura do escoamento foi medida através de um hidrómetro de ponta direita com uma precisão de aproximadamente  $\pm 1.0$  mm, instalado num suporte móvel apoiado nos varões auxiliares

### CAPÍTULO 3. INSTALAÇÕES LABORATORIAIS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

localizados no topo do CRIV (Figura 3.6 c)).

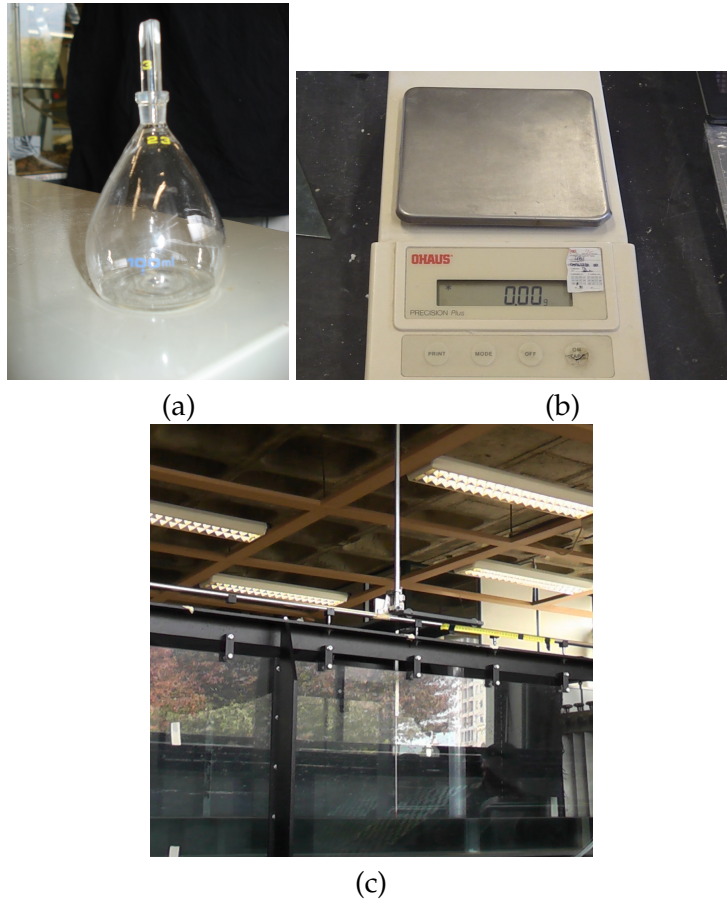


Figura 3.6: a) picnómetro de vidro; b) balança de precisão; c) hidrómetro instalado num suporte móvel.

Um dos parâmetros que influencia a estrutura interna de uma corrente de densidade é o desenvolvimento do leito. A topografia do leito foi obtida com recurso a um sensor de deslocamento a *laser* CCD de alta precisão. Este sistema inclui uma cabeça do sensor da série LK-501 e um controlador da série LK-2501 (Figura 3.7). Na Tabela 3.1 são apresentadas as características principais do sensor de deslocamento.

Este sistema funciona com base no princípio de triangulação óptica e é utilizado para medição da posição ou dimensão de um objeto. A cabeça do sensor é composta por dois subsistemas, um emissor de luz e um recetor de luz (Figura 3.7 a)). O emissor de luz inclui um *laser* semiconductor e um sistema de lentes transmissoras. O recetor de luz inclui um dispositivo de carga acoplada (CCD) e um sistema de lentes recetoras. O *laser* semiconductor produz um raio de luz que passa pelas lentes transmissoras e é focado sobre o alvo. A superfície do alvo de material opaco reflete o feixe de luz que passa pelas

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO

Tabela 3.1: Características do sensor de deslocamento a *laser* CCD.

Fonte de luz	Semicondutora
Comprimento de onda	690 nm
Classe de exposição	IIIb
Distância de referência	350 mm ( $\pm$ 100 mm)
Diâmetro do ponto de luz	$\simeq$ 0.7 mm

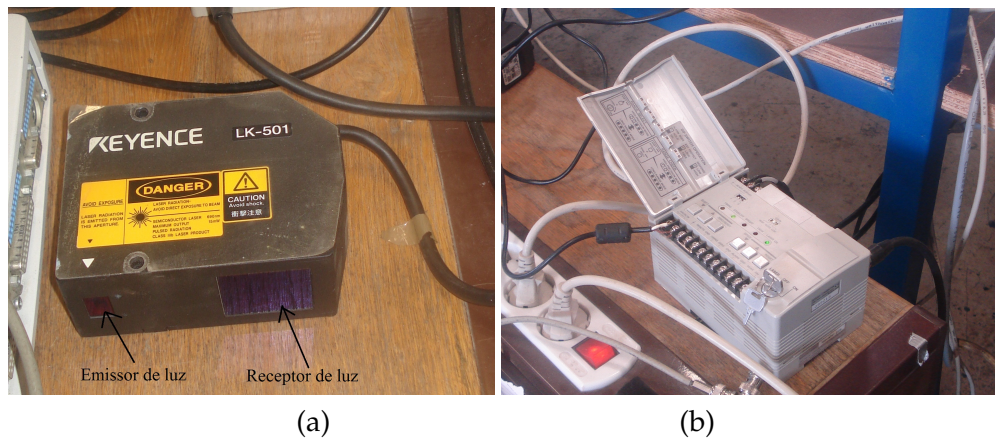


Figura 3.7: Elementos do sensor de deslocamento a *laser* CCD: a) cabeça do sensor; b) controlador do sensor.

lentes recetoras e é focado sobre o CCD (Figura 3.8). O CCD é composto por uma matriz de deteção que tem a funcionalidade de determinar o pico de intensidade de luz que identifica a posição do alvo (Keyence, sd).

O processamento dos sinais analógicos adquiridos pelo sensor de deslocamento é feito através de um sistema de aquisição de dados (DAQ) elaborado pela *National Instruments* (NI) composto por uma combinação de *hardware* e *software*. O *hardware* modular de aquisição de dados é o NI USB-6009 (Figura 3.9 a)) que contém entrada de sinais analógicos e digitais e atua como uma interface entre o *software* e o sensor de deslocamento (Instruments, 2011).

O *software* utilizado foi o *Laboratory virtual instrument engineering workbench* (LabVIEW) que consiste numa linguagem de programação gráfica (linguagem *G*) desenvolvida pelo NI (Figura 3.9 b)). Tem como funcionamento principal o processamento de sinais, análise e visualização de dados adquiridos pelo *hardware*. É dotado de ferramentas gerais que podem ser desenvolvidas pelo utilizador em função do tipo de utilização (Instruments, 2011). A utilização deste sistema tem como objetivo obter a topografia do leito através da



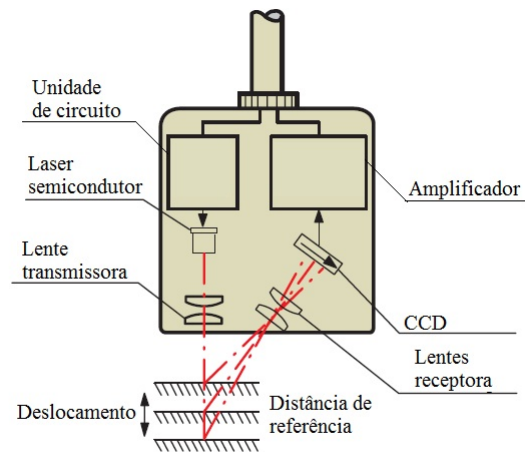


Figura 3.8: Esquema do funcionamento do sensor de deslocamentos a *laser* CCD (adaptado de Keyence (sd)).

medição de cotas. O sensor de deslocamento adquire informação da cota da superfície em volt (unidade da tensão eléctrica do Sistema Internacional) que através da linguagem *G* desenvolvida no LabVIEW é convertida em metros (unidade de comprimento do Sistema Internacional).

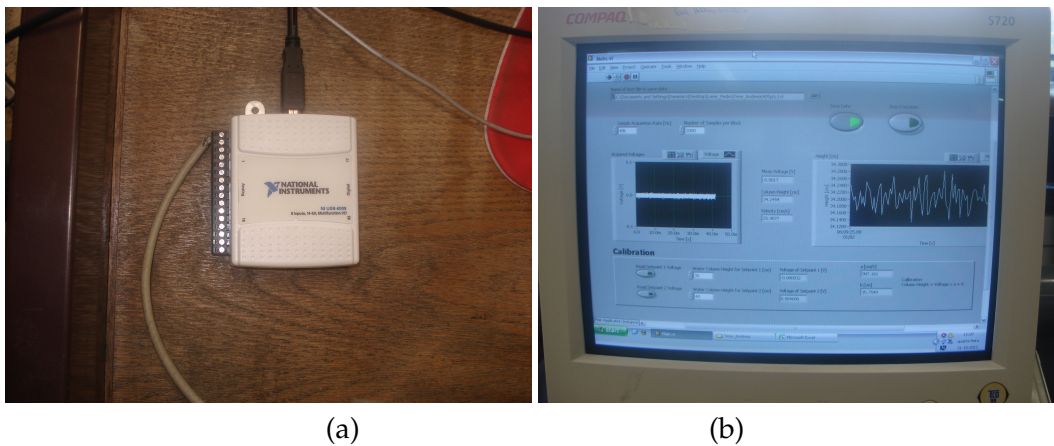


Figura 3.9: Sistema de aquisição de dados: a) *hardware* modular; b) *software*.

## 3.4 Equipamento de medição

### 3.4.1 Noções gerais sobre o PIV

Tal como referido o trabalho consiste na análise de variáveis hidrodinâmicas de uma corrente de densidade. Para tal foram feitas medições de campos de velocidade

instantâneas bidimensionais numa dada seção transversal do fluxo com recurso ao sistema PIV.

O sistema PIV é composto pelas seguintes componentes:

- i) Sistema de *laser*;
- ii) Sistema de captação;
- iii) Sistema de sincronização, processamento e análise de dados;
- iv) Partículas traçadoras (*seeding*).

As medições PIV têm como princípio de funcionamento, esquematizado na Figura 3.10, a estimativa de deslocamentos,  $\Delta d$ , de partículas traçadoras semeadas no fluxo que são iluminadas por um duplo pulso, separado por um intervalo de tempo,  $\Delta t$ , e captadas por uma câmara CCD originando um par de imagens de partículas. Estes são divididos em regiões de pequena dimensão, chamadas de áreas de interrogação, e são correlacionadas entre si identificando o deslocamento médio das partículas.

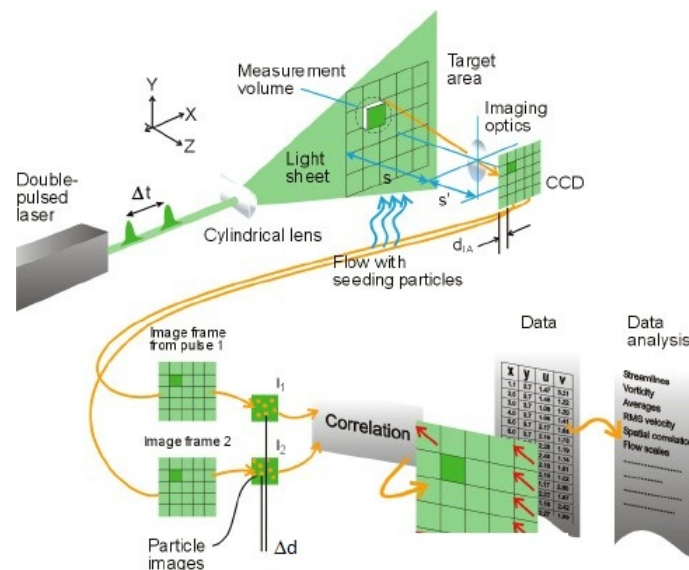


Figura 3.10: Esquema de funcionamento do PIV (disponível em <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1049>, consultada em 13 de Março 2013).

### 3.4.2 Sistema de *laser* e sistema de captação

O sistema de *laser* é do tipo Nd:YAG (cristal de YAG *Yttrium Aluminium Garnet*) de dupla cavidade. É composto por uma cabeça de *laser* (Figura 3.11 a) e um gerador de energia (Figura 3.11 b)). O *laser* Nd:YAG é um *laser* em estado sólido que emite

### CAPÍTULO 3. INSTALAÇÕES LABORATORIAIS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

radiação de alta energia infravermelho (IF) com comprimento de onda  $1064\text{ nm}$ . Fontes de luz que emitem esta gama de radiação apresentam dificuldades na visualização das partículas tanto a nível do sistema de captação como ao nível do utilizador. A cabeça do *laser* possui um gerador de segunda harmónica (SHG) que converte a luz IF em luz verde (considerada luz visível) com comprimento de onda de  $532\text{ nm}$ , garantido a sua visualização e garantindo que as partículas traçadoras não apresentam aberrações cromáticas (Raffel et al., 2007, p. 28,29 e 39).

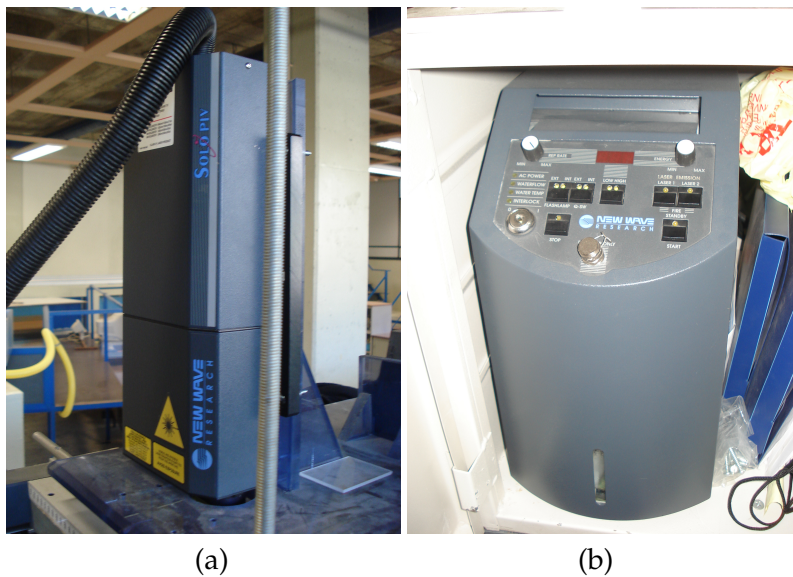


Figura 3.11: Sistema de *laser*: a) cabeça de *laser*; b) gerador de energia.

A exposição à radiação emitida pelo *laser* apresenta risco à segurança do utilizador, deste modo foram estipuladas medidas de segurança. Sempre que o *laser* esteja em funcionamento os utilizadores devem colocar óculos de proteção com filtros de luz verde (Figura 3.12 a)). Como os ensaios decorriam num período normal de trabalho e devido à grande probabilidade de decorrer vários trabalhos experimentais em simultâneo a limitação do acesso ao laboratório nem sempre é garantida, deste modo colocou-se informação à entrada do laboratório (Figura 3.12 b)) que indica que o *laser* está em funcionamento e procedeu-se à montagem de uma estrutura que minimiza a exposição à radiação e limita o acesso ao CRIV.

A cabeça do *laser* é de dupla cavidade e contém lâmpada *flash* que produz impulso de luz e interruptor de qualidade (*Q-switch*) que permite acionar o impulso e gerar impulsos duplos possibilitando que o utilizador ajuste o intervalo de tempo entre pulsos (Raffel et al., 2007, p. 28-29).



### 3.4. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

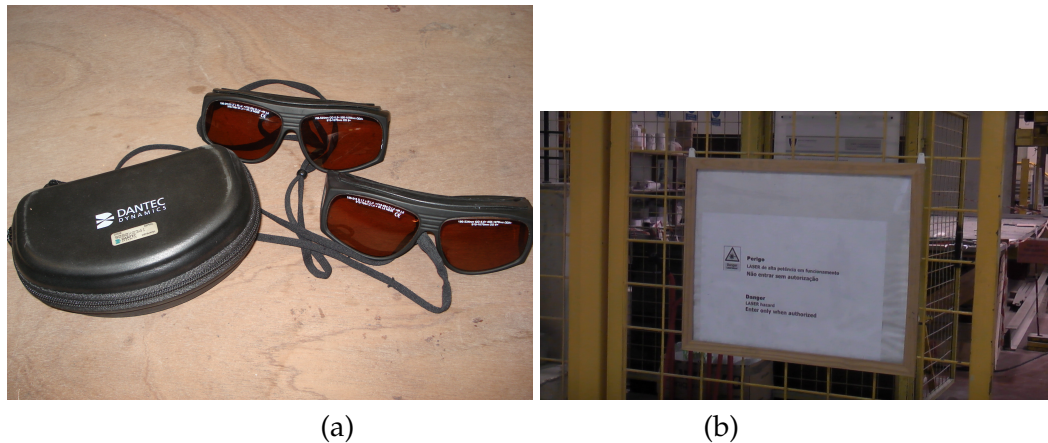


Figura 3.12: Medidas de segurança: a) Oculos de proteção; b) sinalização de utilização do *laser*.

O gerador de *laser* é composto por um painel de controlo que possibilita a escolha de dois modos de disparo, modo interno e modo externo. O modo interno ativa o processo de disparo através do próprio painel e o utilizador controla a taxa de repetição e a intensidade de luz, no caso do modo externo os dispositivos de entrada que fazem a interligação entre o sistema de *laser* e o *software* são ativados e o utilizador através do *software* controla o tempo entre dois pulsos,  $\Delta t$ , e a duração do pulso (secção 3.4.3). Na Tabela 3.2 são apresentadas as características do sistema de *laser*.

Tabela 3.2: Características do sistema de *laser*.

Modelo	Solo II PIV 30
Comprimento de onda (nm)	532
Energia (mJ)	30
Frequência máxima (Hz)	15

O PIV mede campos de velocidade de uma seção transversal do fluxo iluminada por uma folha de luz fina. Estas são originadas por um sistema de lentes ópticas que é composto por uma lente esférica e uma lente cilíndrica colocadas na cabeça do *laser*. A lente esférica permite ajustar a espessura da folha de luz, numa gama de 0.6 mm e 2 mm e a lente cilíndrica origina uma folha de luz com um ângulo de divergência de 30° (Simão et al., 2009).

O sistema de captação é composto por uma câmara CCD FlowSense 2M Dantec® (Figura 3.13 a)). O sensor CCD capta a luz dispersa das partículas traçadoras sobre um fundo escuro e converte em cargas elétricas originando quadro de imagem em tons de cinzento

### CAPÍTULO 3. INSTALAÇÕES LABORATORIAIS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

(Figura 3.13 b)). Apresenta uma resolução espacial de 1600x1200 pixels e um sistema de focagem manual diminuindo o tempo de alinhamento da zona de medição (Raffel et al., 2007, p. 69 e 72).

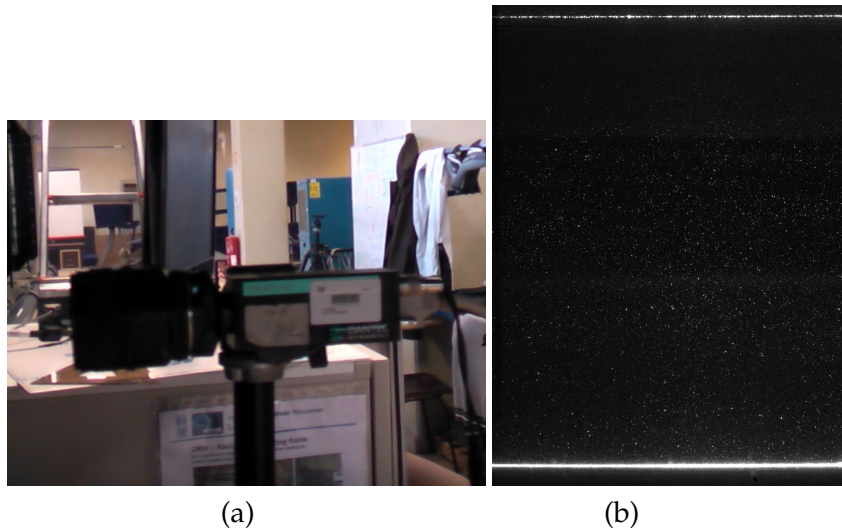


Figura 3.13: Sistema de captação: a) Câmara CCD; b) Imagem de partículas.

#### 3.4.3 Sistema de sincronização, processamento e análise de dados

O sistema de sincronização, processamento e análise de dados é composto por um dispositivo de sincronização (Figura 3.14 a)) e um *software* de aquisição e análise de dados, o DynamicStudio<sup>®</sup> da Dantec Dynamics (Figura 3.14 b)).

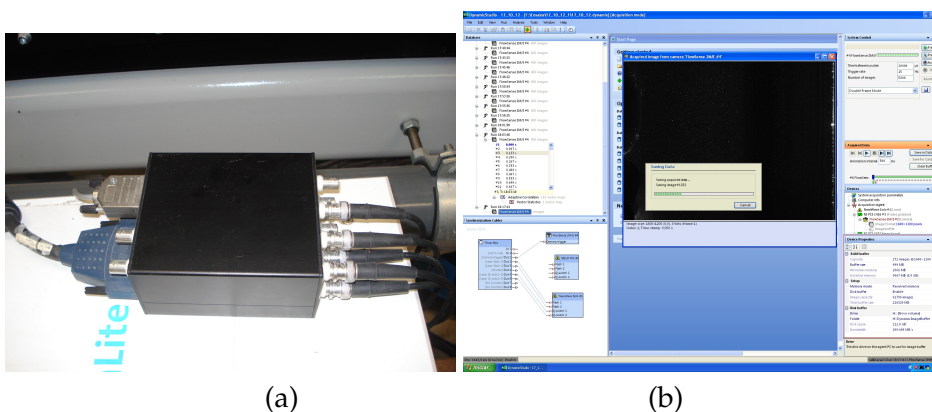


Figura 3.14: Elementos do sistema de sincronização, processamento e análise de dados: a) dispositivos de sincronização; b) software DynamicStudio<sup>®</sup>.

O dispositivo de sincronização atua como a interface entre as componentes do sistema

garantindo uma sincronização temporal precisa. Como a câmara CCD funciona a altas velocidades com um tempo de registo de imagem reduzido deve-se garantir que o pulso do *laser* ocorre no instante em que o obturador está aberto. A técnica utilizada consiste em acionar o primeiro pulso de luz no instante inicial do processo de registo de imagem (fecho do obturador) originando a primeira imagem e o segundo pulso de *laser* no instante final do processo de registo de imagem (abertura do obturador) originando a segunda imagem, permitindo que o tempo de registo seja o ideal para obter medições confiáveis de escoamentos de elevada velocidade (Raffel et al., 2007, p. 101-108). A frequência de aquisição de dados corresponde ao inverso do tempo de aquisição de um par de imagens e é escolhido em função da capacidade das componentes do sistema e das condições do escoamento.

O sistema PIV é considerado um sistema indireto no sentido em que o mapa de velocidades instantâneas não é obtido a partir do movimento do fluido mas através da determinação do deslocamento de partículas traçadoras ideais colocadas no fluido no intervalo de tempo finito,  $\Delta t$ . As imagens de partículas são caracterizadas por apresentarem um padrão aleatório de partículas que é alterado ao longo do tempo. O acompanhamento dessa mudança de padrão possibilita avaliar o deslocamento destas e determinar a sua velocidade. Cada par de imagem é dividida em regiões de pequena dimensão, chamada de áreas de interrogação, e é aplicado uma abordagem estatística que estima o movimento linear do grupo de partículas da região (Westerweel, 1997).

A função de correlação cruzada (*cross-correlation*) é uma das técnicas estatísticas mais utilizadas no sistema PIV porque apresenta maior grau de precisão e funciona através de uma metodologia de fácil aplicação. É uma função que baseia-se no algoritmo da transformada de Fourier e mede estatisticamente a concordância dos deslocamento entre partículas. De forma simplificada, a função de correlação é determinada por,

$$R_{II}(dx, dy) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N I(i, j)I'(i + dx, j + dy) \quad (3.1)$$

onde  $I$  e  $I'$  representam a intensidade dos tons de cinzento do quadro de imagem, e  $dx$  e  $dy$  representam o deslocamento bidimensional entre as imagens correlacionadas. A intensidade dos tons de cinzento varia no intervalo de 0 a 1, onde o pixel mais brilhante corresponde ao maior valor de intensidade (Raffel et al., 2007, p. 133-135).

A Figura 3.15 a) mostra o pico da função de correlação cruzada no mapa de correlação. O posicionamento do pico representa o vetor médio do deslocamento do grupo de partículas da área de interrogação (Figura 3.15 b)). Através da aplicação de estimadores de interpolação sub-pixel a posição do pico pode melhorar (detalha em (Raffel et al.,

2007, p. 158 a 161)). O ajuste Gaussiano (*Gaussian peak fit*) apresenta melhores resultados porque ajusta o pico de correlação a uma curva Gaussiana (Westerweel, 1997; Raffel et al., 2007, p. 158 e 161).

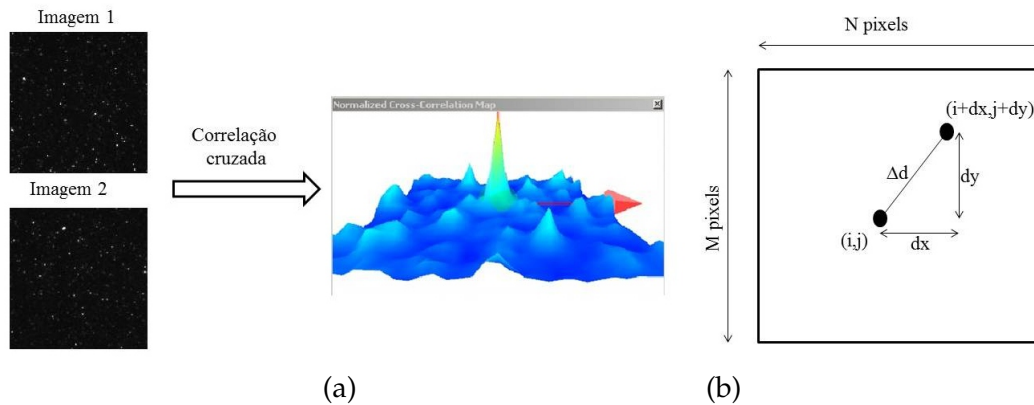


Figura 3.15: a) Mapa de correlação cruzada tridimensional; b) deslocamento médio do grupo de partícula.

Para que os resultados sejam confiáveis, a identificação do pico de correlação no mapa deve ser clara. A Figura 3.16 mostra a diferença entre um mapa de correlação com uma relação de sinal-ruído reduzida e um mapa de correlação com uma relação de sinal-ruído elevada. Qualidade da imagem de partículas, movimento de partículas para fora do plano (*out-of-plane*), são exemplos que influenciam a relação sinal-ruído e podem ser evitados através da escolha adequada das partículas traçadoras (secção 3.4.4), do intervalo de tempo entre pulsos e do tamanho da área de interrogação (Raffel et al., 2007, p. 139-143).

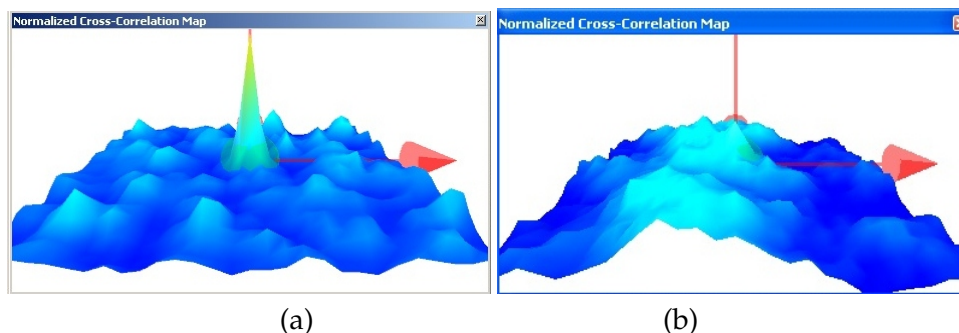


Figura 3.16: a) Mapa de correlação cruzada de alta precisão; b) Mapa de correlação cruzada de baixa precisão.

O fenômenos *out-of-plane* ocorrem quando as partículas traçadoras saem do plano de

medição no intervalo de tempo entre pulsos, isto é, as partículas presentes na primeira imagem não se encontram na segunda imagem. Este fenómeno pode ocorrer devido à escolha inadequada do intervalo de tempo ou da dimensão da área de interrogação. O intervalo de tempo entre pulsos deve ser suficientemente pequeno e o tamanho da área de interrogação deve ser suficientemente grande de modo a minimizar a ocorrência de fenómenos *out-of-plane* (Raffel et al., 2007, p. 176).

A diminuição do intervalo de tempo entre pulsos poderá originar medições de deslocamento muito pequenas condicionando a correlação do algoritmo de interpolação sub-pixel, no sentido de este considerar o deslocamento como nulo (Raffel et al., 2007, p. 137). Segundo Raffel et al. (2007) o deslocamento da partícula deve ser aproximadamente 25% da dimensão da área de interrogação para que os resultados apresentem uma taxa de sucesso satisfatória.

O aumento da dimensão da área de interrogação leva ao aumento do número de partículas e conseqüentemente um elevado número de deslocamentos medidos produzindo estatísticas mais grosseiras (Wereley e Meinhart, 2000). Outro problema que pode ocorrer com o aumento da área de interrogação é a perda de informação de fluxos com gradientes de velocidade significativos, como o sistema PIV apoia-se num par de imagens apenas são considerados movimentos linear. Deste modo deve existir um compromisso na escolha do tamanho da janela, isto é, este deve ser suficientemente grande de modo a minimizar o fenómeno *out-to-plane* e suficientemente pequeno garantindo que o gradiente de velocidade não seja significativo e que o número de partículas seja o adequado (Wereley e Meinhart, 2000).

O algoritmo de correlação adaptativo (*adaptive-correlation*) é um modelo sofisticado da correlação cruzada que melhora a resolução espacial e a precisão espacial, e consiste num processo iterativo onde as áreas de interrogação são reduzidas sucessivamente (Wereley e Meinhart, 2000), garantindo que fenómenos como *out-of-plane* e velocidades de valor nulo tenham uma probabilidade de ocorrência menor.

Após a determinação dos deslocamentos das áreas de interrogação o mapa de velocidades instantâneas é calculado por:

$$u_i(x, y) \simeq \frac{d_i}{\Delta t} \quad (3.2)$$

onde  $u_i$  denota a velocidade instantânea segundo a componente  $i$ ,  $d_i$  o deslocamento do grupo de partículas segundo a componente  $i$  estimado pela função de correlação e  $\Delta t$  o intervalo de tempo entre dois pulsos consecutivos.

Por vezes o campo de velocidades instantâneas apresenta valores discrepantes comparativamente com os vetores vizinhos. O sistema PIV possui ferramentas que identificam e eliminam dados erróneos com base em dados definidos. A verificação da consistência espacial é a abordagem mais comum por apresentar maior eficiência e é composta por três métodos possíveis de comparação: média global, média local e mediana local. A média global consiste na comparação dos vetores de campo de velocidade em conjunto, a média local compara um vetor individual com a média dos vetores vizinhos mais próximos e a mediana local utiliza o mesmo método que a média local mas baseia-se no valor mediano local, esta apresenta maior eficiência porque é mais robusta no que diz respeito à estimativa do residuo na presença de vetores erróneos vizinhos (Westerweel, 1994).

#### 3.4.4 Partículas traçadoras

Os fluxos não apresentam propriedades favoráveis à recuperação de informação pelo sistema PIV o que leva à necessidade de adicionar partículas traçadoras que permitam a visualização do movimento pelo sistema. Atualmente existe uma grande variedade de produtos comerciais de partículas traçadoras sólidas que apresentam diferentes tamanhos, formas e densidades o que leva à necessidade de analisar as suas características com o objetivo de garantir precisão na determinação do campo de velocidade (Melling, 1997). As características dinâmicas das partículas traçadoras e propriedades que garantam condições de imagem de partícula favoráveis são critérios que devem ser analisados. Westerweel (1997) afirma que a partícula é considerada como um marcador ideal quando não altera as características do fluxo e apresenta eficácia no seguimento do movimento do fluxo.

Um dos aspetos que pode influenciar os resultados é a diferença entre a velocidade da partícula,  $v_p$ , e a velocidade do fluxo,  $v_f$ , que pode ser originada por forças de gravidade dominantes devido à diferença entre as densidades, ao tamanho e forma da partícula e à viscosidade do fluxo (Raffel et al., 2007, p. 15). Embora em situações práticas as forças gravíticas são negligenciadas, Zhang et al. (2004) explica detalhadamente a equação do movimento da partícula. Com base na lei de Stokes e admitindo que o fluxo encontra-se num limite estacionário e que as partículas apresentam uma forma esférica, observou que a diferença de velocidade dada pela equação 3.3 torna-se num algoritmo simples.

$$(v_f - v_p) = \frac{(\rho_p - \rho_f) g d_p^2}{18\mu_f} \quad (3.3)$$

onde  $\rho_f$  e  $\rho_p$  é a massa volúmica fluido e da partícula, respetivamente,  $g$  a aceleração gravítica,  $d_p$  o diâmetro da partícula e  $\mu_f$  a viscosidade dinâmica do fluido. A equação mostra que a diferença entre velocidades diminui em função da aproximação das

densidades e da diminuição do diâmetro da partícula.

Uma adequada dispersão de luz das partículas otimiza a estimativa do deslocamento, na medida em que produz intensidades de imagens apropriadas para a metodologia implementada (secção 3.4.3). Esta depende do índice de refração das partículas no meio circundante, do tamanho, da forma e da orientação da partícula, da polarização e do ângulo de observação (Raffel et al., 2007, p. 18-21). O grau de dispersão de luz da partícula, a densidade da imagem e a granulometria das partículas são critérios que aumentam a relação sinal-ruído e conseqüentemente influenciam os resultados.

Melling (1997) comparou diferentes diâmetros de partículas através da contabilização da dispersão da seção transversal da partícula,  $C_{sr}$ , que representa a relação entre a energia total de dispersão e a intensidade do *laser*, e verificou que a dispersão de luz aumenta com o aumento do diâmetro da partícula. Raffel et al. (2007) através da aplicação da teoria de dispersão de Mies caracteriza o diâmetro normalizado,  $q$ , admitindo que as partículas apresentam uma forma esférica e diâmetro,  $d_p$ , maior que o comprimento de onda da luz incidente,  $\lambda$ , com recurso à seguinte equação:

$$q = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad (3.4)$$

Observou que para diâmetros normalizados superiores a zero os máximos locais surgem na distribuição angular ao longo da gama de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  e que aumentam com o aumento do diâmetro da partícula (Figura 3.17). Conclui-se que a relação sinal-ruído diminui com o aumento do diâmetro das partículas.

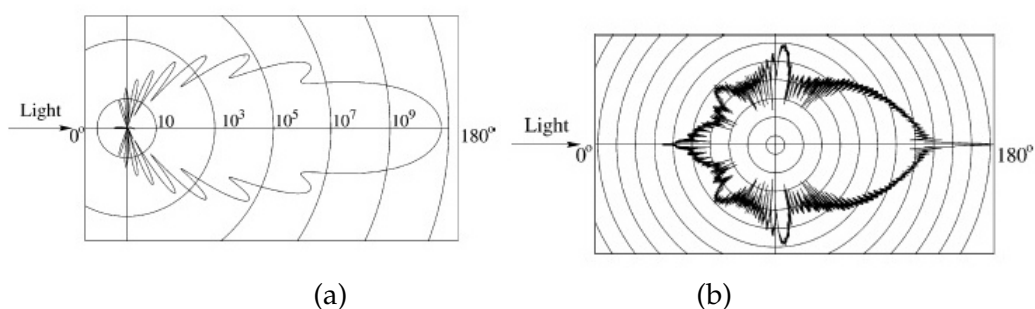


Figura 3.17: Dispersão de luz para partículas de vidro esféricas na água: a)  $10 \mu m$  de diâmetro; b)  $30 \mu m$  de diâmetro (Adaptado de (Raffel et al., 2007, p. 20)).

Por vezes imagens com padrão aleatório de partículas podem originar diferentes percepções e por conseqüente diferentes estimativas de deslocamento. No caso em que a concentração de partículas é reduzida a correlação de imagens pode originar um pico grosseiro dificultando a identificação deste (Raffel et al., 2007, p. 166-176). Uma

### CAPÍTULO 3. INSTALAÇÕES LABORATORIAIS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

elevada concentração de partículas pode dificultar a identificação do par de imagem de partículas originando deslocamentos erróneos (Westerweel, 1997). Com base nisto é necessário existir um compromisso na escolha do quantidade de partículas de modo que a medição seja precisa.

A elevada concentração de partículas também poderá originar um processo de interação entre partículas podendo afetar o fluxo. Zhang et al. (2004) apresentou um requisito que compreende uma estimativa da quantidade de partículas a ser adicionadas no fluido de modo a que a distância entre elas seja 100 vezes maior que o diâmetro, diminuindo a probabilidade de interação entre elas e facilitando a identificação das partículas. Keane e Adrian (1990) afirmaram que cada área de interrogação deve ter cerca de 15 partículas sendo que este número aumenta com o aumento da velocidade (citado em Melling (1997)).

Outro aspeto importante que influencia a precisão dos resultados é a granulometria das partículas traçadoras. Tal como foi referido o nível de dispersão de luz aumenta com o aumento do diâmetro, deste modo a existência de diferenças significativas no tamanho das partículas origina intensidades de luz de níveis diferentes e por consequente o aumento da relação sinal-ruído (Melling, 1997).

Neste trabalho laboratorial analisou-se dois tipos de partículas traçadoras comercializadas pelo MicroChem designadas de DECOSOFT<sup>®</sup> 60 transparente e DECOSOFT<sup>®</sup> 60 branco. A massa volúmica do DECOSOFT 60 transparente é de  $1.05 \text{ g/cm}^3$  e a do DECOSOFT 60 branco é de  $1.31 \text{ g/cm}^3$ , e os diâmetros médios das partículas variam entre 50 e 70  $\mu\text{m}$ . Através de uma análise microscópia realizada no Laboratório Microscopia do Departamento de Engenharia dos Materiais do Instituto Superior Técnico, observou-se que ambos os materiais apresentam uma grande percentagem de finos o que poderá aumentar a relação sinal-ruído (Figura 3.18).

Com base na metodologia referida por Melling (1997) foi avaliada a capacidade da partícula acompanhar o fluido através da solução de Hjermfelt e Mockros (1996) que consiste na razão das energias de flutuação do tempo médio da partícula e o movimento do fluido,  $r_p$ . Para o caso em que a relação entre a densidade da partícula e a densidade do fluido é próxima da unidade, a razão é dada por:

$$\frac{\overline{v_p^2}}{v_f^2} \equiv r_p = \left(1 + \frac{2\pi f_c}{C}\right)^{-1} \quad (3.5)$$

onde,



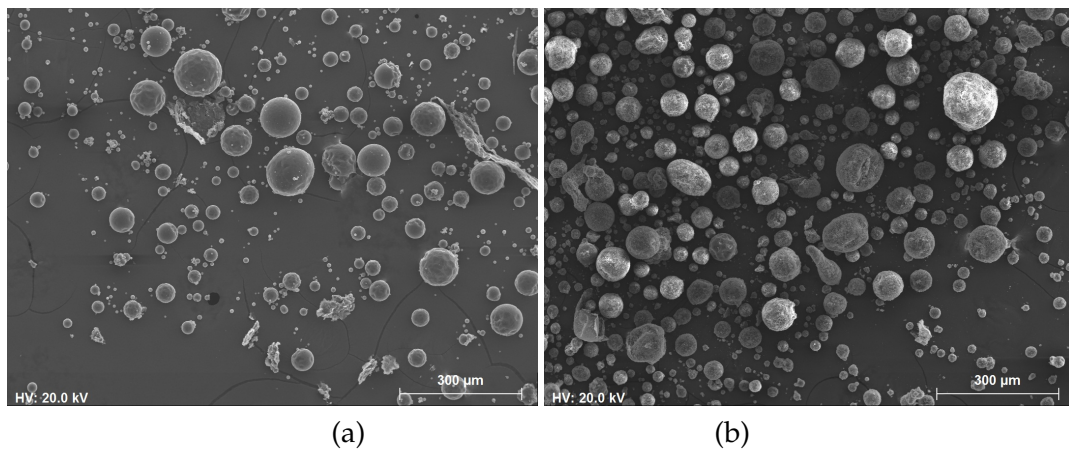


Figura 3.18: Imagem microscopia digital: a) DECOSOFT 60 transparente; b) DECOSOFT 60 branco.

$$C = \frac{18\nu_f}{\rho_p d_p^2} \quad (3.6)$$

$v_p$  e  $v_f$  representam o módulo da velocidade da partícula e do fluido, respetivamente,  $f_c$  a frequência da estrutura turbulenta do fluxo,  $d_p$  o diâmetro médio das partículas,  $\nu_f$  a viscosidade cinemática do fluido e  $\rho_p$  a massa volúmica da partícula. Segundo Melling (1997) valores superiores a 0.95 são considerados satisfatórios.

A Figura 3.19 mostra que em ambos os materiais a razão varia de igual modo e que para um valor de 0.95 o limite de frequência é de 30 Hz. Logo do ponto de vista de representação do movimento do fluido são consideradas partículas traçadoras ideais para a frequência de aquisição do sistema PIV de 15 Hz, aplicada nos ensaios.

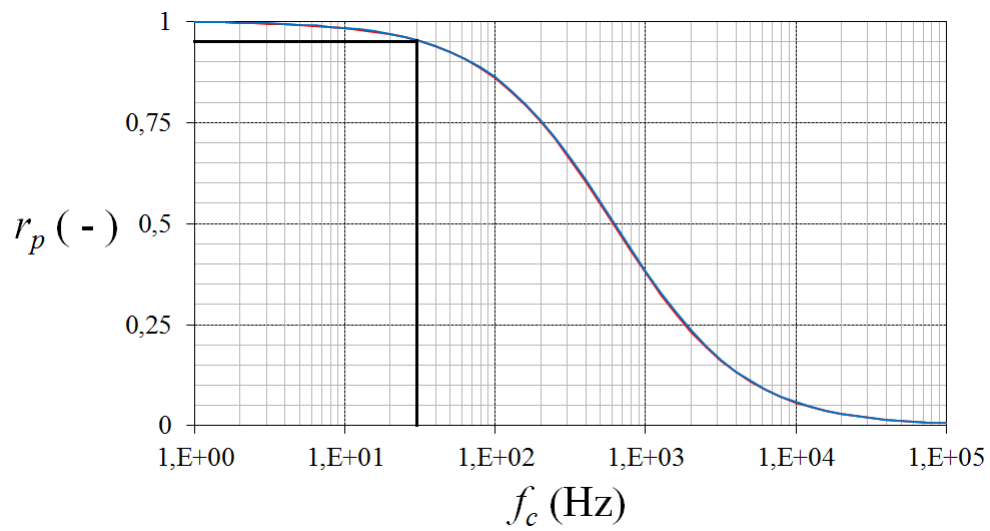


Figura 3.19:  $r_p$  em função da frequência para as partículas DECOSOFT 60 transparente (-) e DECOSOFT 60 branco (-), com  $60 \mu m$  de diâmetro.

## Capítulo 4

# Procedimento experimental e tratamento de dados

### 4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada uma descrição do procedimento experimental e do processo de tratamento de dados. O trabalho experimental consiste na simulação física de correntes de densidade salinas contínuas que se propagam sobre o leito de um canal no interior de uma massa de água inicialmente em repouso de densidade inferior (fluido ambiente). Foram realizados dois conjuntos de ensaios que diferem no tipo de rugosidade do leito e na massa volúmica da mistura salina com o objetivo de estudar o efeito da rugosidade e do excesso de massa volúmica,  $\Delta\rho$ , na estrutura interna da corrente salina. De forma a caracterizar a variação espacial da estrutura interna da corrente foram realizadas medições de velocidade em duas posições longitudinais, no centro do canal (Figura 4.1 a)). Os dois conjuntos de ensaios são:

- i) Leito rugoso (R): foram realizados dois ensaios que diferem na massa volúmica inicial da mistura salina,  $1010 \text{ kg/m}^3$  (R1) e  $1020 \text{ kg/m}^3$  (R2);
- ii) Leito liso (S): foram realizados dois ensaios que diferem na massa volúmica inicial da mistura salina,  $1010 \text{ kg/m}^3$  (S1) e  $1020 \text{ kg/m}^3$  (S2);

O leito rugoso é composto por uma camada de material granular formado por seixo rolado com  $3.5 \text{ cm}$  de diâmetro médio ao longo do canal (Figura 4.1 b)). O leito liso é composto pelo fundo liso em alumínio do CRIV (Figura 4.1 c))

### 4.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental é composto por quatro fases. A primeira fase consiste no processo de calibração dos equipamentos utilizados; seguida dos procedimentos

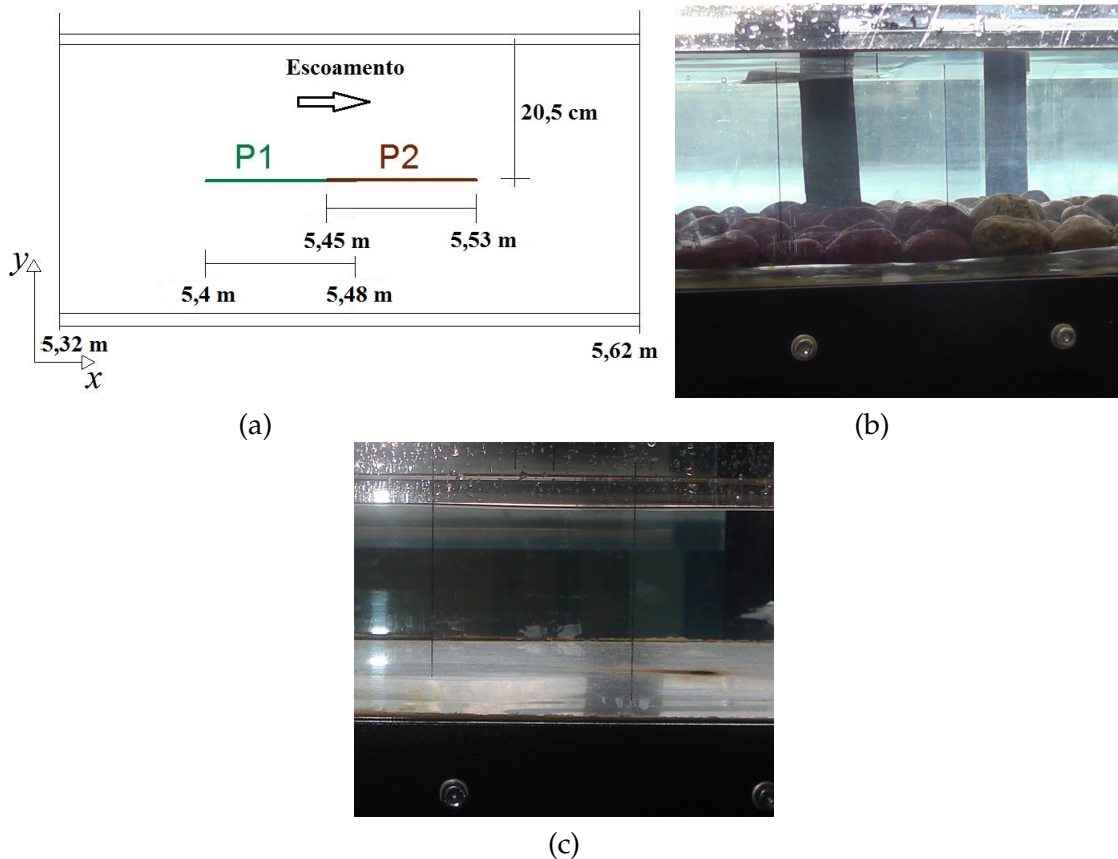


Figura 4.1: a) Localização da zona de medição (P1 e P2); b) leito rugoso; c) leito liso.

relacionados com a preparação da instalação laboratorial; preparação do equipamento de medição e da zona de medição; por fim, realização do ensaio. No caso do conjunto dos ensaios de leito rugoso, este terá uma quinta fase que consiste no levantamento topográfico do leito com recurso a um sensor de deslocamento a *laser* CCD de alta precisão anteriormente descrito.

A determinação da massa volúmica da mistura de água salina,  $\rho_i$ , baseia-se na medição da massa da solução contida no picnómetro com recurso a uma balança de precisão, e estimada através da seguinte equação:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_{pic}} \quad (4.1)$$

onde,  $m_i$  representa a massa da solução e  $V_{pic}$  o volume do picnómetro.

A massa da solução,  $m_i$ , é determinada através da média aritmética de três pesagens de massa. O picnómetro não deve apresentar bolhas de ar no interior nem solução nas paredes exteriores. Para que os resultados sejam precisos e fiáveis é necessário calibrar

## 4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

o picnómetro através da determinação exata do seu volume. O processo de calibração foi realizado com recurso a água destilada à temperatura ambiente ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) e a partir da equação 4.1 estimou-se o volume exato do picnómetro,  $V_{pic} = 95.98 \text{ ml}$ .

Um dos critérios impostos neste trabalho experimental é criar um corpo de corrente de densidade *quasi*-permanente após a passagem da sua frente de carácter variável. O sistema de circulação é composto por um sistema de alimentação, que define as características da corrente, e um sistema de drenagem responsável pela permanência da cota da superfície livre do escoamento no decorrer do ensaio. Ambos os sistemas não possuem medidor de caudal, o que torna o processo delicado. De forma a minimizar as incertezas, foram realizados testes em que se estimou o limite de abertura das válvulas na seção a jusante que garanta a permanência do nível de água, enquanto a montante a corrente é inserida no canal. Definido o limite, procedeu-se à determinação do caudal de entrada da mistura, sendo  $Q = 33.89 \text{ ml/s}$ . É necessário que o nível de solução do funil se mantenha ao longo do ensaio garantindo que a vazão seja constante.

A preparação da instalação laboratorial inicia-se com a limpeza do canal e do tanque de mistura de forma a remover todas as impurezas provenientes de outros ensaios que poderão influenciar os resultados. Posteriormente procede-se à preparação da solução salina que será armazenada no tanque de mistura, através da adição de sal *kosher* de forma faseada a 450 litros de água. A Figura 4.2 apresenta a relação entre a quantidade de sal adicionado a 450 litros de água e a densidade da mistura.

As medições de massa e a determinação da massa volúmica da mistura salina são realizadas através da metodologia apresentada anteriormente, e são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Massa e massa volúmica da mistura de água salina para cada ensaio.

Zona de medição	Ensaio	$m_i$ (g)	$\rho_i$ ( $\text{kg/m}^3$ )
P1	R1	96.94	1010.00
	R2	97.90	1020.00
	S1	96.95	1010.11
	S2	97.91	1020.11
P2	R1	96.92	1009.79
	R2	97.91	1020.11
	S1	96.94	1010.00
	S2	97.90	1020.00

Através de um sistema de nível de bolha de ar ao longo do canal verifica-se que este

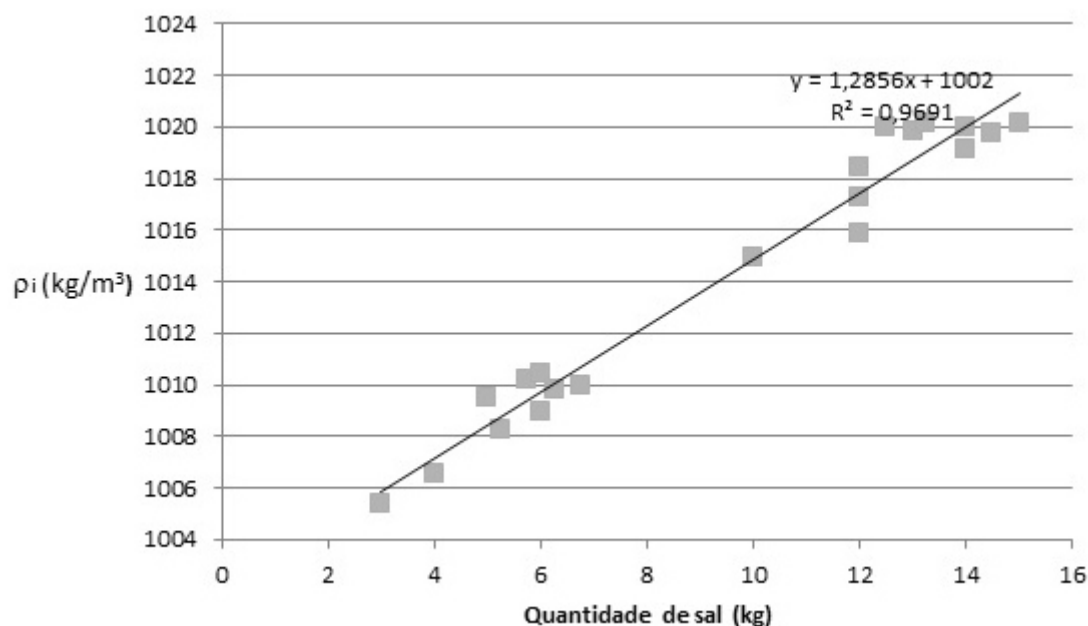


Figura 4.2: Relação entre a quantidade de sal adicionado a 450 litros de água e a densidade de mistura.

apresenta declive nulo (Figura 4.3 a)), o que significa que a velocidade de propagação da corrente de densidade depende principalmente da diferença de massa volúmica entre os fluidos e do caudal de entrada da solução salina. Fecha-se a válvula do sistema de alimentação e do sistema de drenagem e enche-se o canal com água até à altura estipulada (Figura 4.3 b)).

A câmara CCD foi posicionada perpendicularmente ao plano a uma distância de aproximadamente 40 *cm*. A estimativa deste valor foi definida experimentalmente, onde se verificou que a área de interrogação de resolução espacial de 32x32 pixels apresenta um padrão com cerca de 15 partículas traçadoras (secção 3.4.4). De modo a evitar distorções de imagem verifica-se que a câmara CCD está horizontal através de um nível digital (Figura 4.4 a)).

De seguida é realizada a calibração da câmara CCD através de um processo de focagem manual de um objeto graduado colocado na zona de medição (Figura 4.4 b)). Após a focagem é feito o registo da imagem que será utilizada na conversão das unidades das velocidades instantâneas (secção 4.3). O laser é colocado verticalmente no suporte móvel e a folha de luz é alinhada manualmente com o objeto graduado, garantindo que esta ilumina a zona de medição (Figura 4.4 c)). É necessário garantir que na zona de medição captada pela câmara CCD seja visível o leito e a superfície livre.

Inicialmente foram realizados testes para analisar quais as variáveis de aquisição de

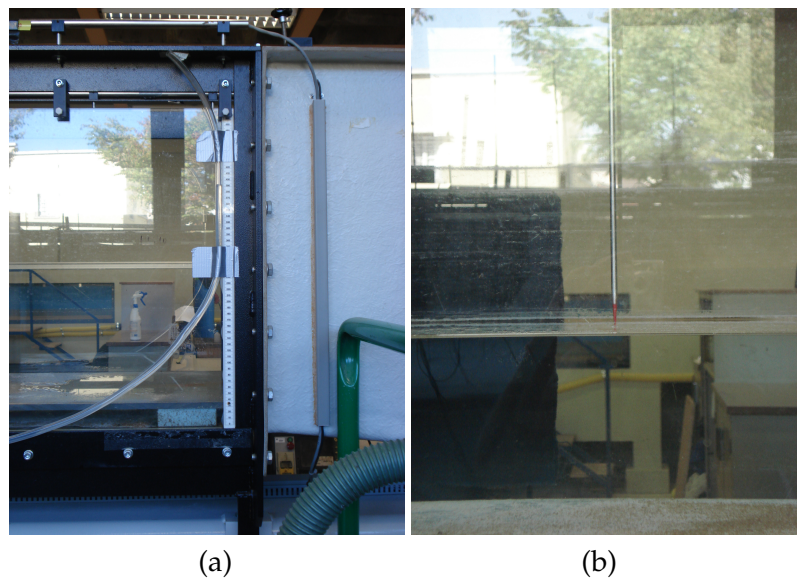


Figura 4.3: a) Sistema de nível de bolha de ar para verificação do declive do canal; b) medição da altura da coluna de água.

dados do sistema PIV adequadas e qual a quantidade de partículas traçadoras que deve ser adicionada para que a imagem apresente um padrão confiável. Relativamente à escolha das partículas traçadoras observou-se que o DECOSOFT 60 branco torna o fluxo turvo (Figura 4.5), possivelmente devido à quantidade excessiva de partículas finas, pondo em causa a qualidade da imagem, tendo-se optado pelo DECOSOFT 60 transparente. A quantidade de partículas traçadoras foi determinada com base nos critérios descritos na seção 3.4.4, e verificou-se que seria necessário colocar cerca de 60 g de partículas traçadoras no tanque de mistura e 12 g de partículas traçadoras no canal. O processo de colocação de partículas traçadoras no canal deve ser feito de forma delicada, garantindo que as partículas não repousem no leito.

A escolha das variáveis de aquisição de dados inclui o intervalo de tempo entre pulsos,  $\Delta t$  ( $\mu s$ ), a frequência de aquisição,  $f$  (Hz), e o número de pares de imagens. Foram realizadas várias medições com diferentes intervalos de tempo entre pulsos na gama de 10000 a 25000  $\mu s$  e verificou-se que estes não apresentam resultados com diferenças significativas, utilizou-se 20000  $\mu s$  como valor de referência. A resolução temporal é um parâmetro importante no sentido em que proporciona uma análise precisa das características do fluido ao longo do tempo. A definição da resolução temporal é realizada através da escolha do número de aquisições de pares de imagens, e corresponde ao inverso da frequência de pares de imagens multiplicado pelo número de aquisições. Na Tabela 4.2 são apresentadas as variáveis de aquisição para cada experiência.



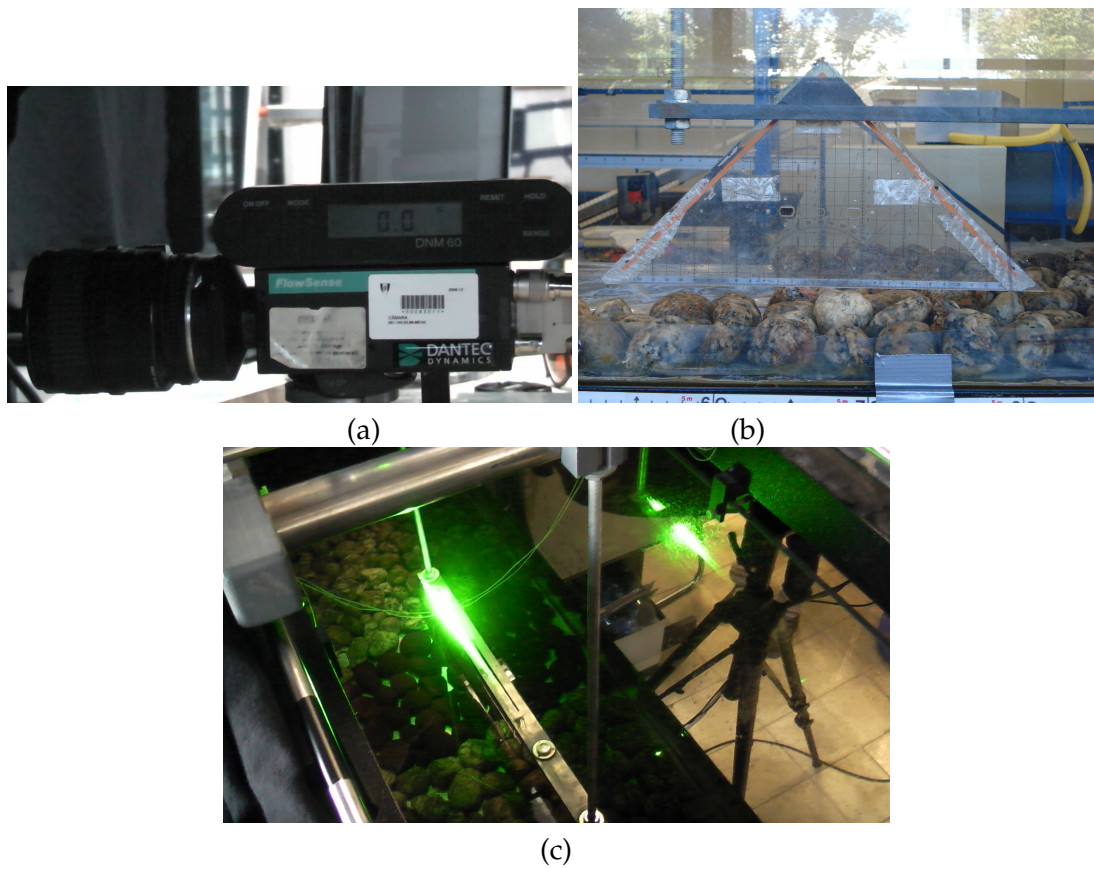


Figura 4.4: a) Posicionamento da câmara; b) objeto graduado; c) processo de alinhamento da folha de luz.



Figura 4.5: Partículas traçadoras DECOSOFT 60 branco.

De forma a minimizar a relação sinal-ruído foi necessário colocar papel preto na parede oposta devido aos reflexos originados pelo leito e uma folha de acetato na superfície



Tabela 4.2: Variáveis de aquisição do sistema PIV.

Zona de medição	Ensaio	$\Delta t$ ( $\mu s$ )	$f$ (Hz)	Número de aquisições	Número de imagens ( $N_I$ )	Resolução espacial ( $min$ )
P1	R1	20000	15	12	400	5.33
	R2			1	6300	7.00
	S1			1	6300	7.00
	S2			1	6300	7.00
P2	R1	20000	15	1	6300	7.00
	R2			1	6300	7.00
	S1			1	6300	7.00
	S2			1	6300	7.00

livre para evitar o aparecimento de sombras originadas pela difração do feixe de laser no processo de passagem pela superfície livre.

A bomba submersível é colocada no tanque de mistura e é acionada, abastecendo o funil até ao nível de água estabelecido (Figura 4.6 a) e b)). O ensaio inicia-se no instante em que o sistema de alimentação e o sistema de drenagem são abertos. Procede-se à aquisição de dados cerca de dois minutos após a passagem da cabeça da corrente pela zona de medição, garantindo que as medições são realizadas no corpo da corrente.

No decorrer do ensaio é registado a temperatura do fluxo através de um termómetro digital (Figura 4.6 c)), permitindo a análise do efeito da temperatura no desenvolvimento da corrente de densidade. A partir da Tabela 4.3 verifica-se que a diferença de temperatura entre ensaios não é significativa, não tendo grande influência sobre o escoamento.

Tabela 4.3: Temperatura do escoamento ( $^{\circ}C$ ).

	R1	R2	S1	S2
P1	21.6	19.1	18.5	18.9
P2	20.1	20.4	17.8	18.8

Após a finalização das medições do conjunto de ensaios de leito rugoso procedeu-se ao levantamento topográfico do leito. Este processo consiste na medição de cotas através do sistema descrito na seção 3.2. Foram realizadas medições em pontos de uma malha fictícia de 13 cm por 7 cm espaçados de 5 em 5 mm. O processo de transição de ponto é realizado de 30 em 30 segundos garantindo que em pelo menos 15 segundos desse tempo o *laser*

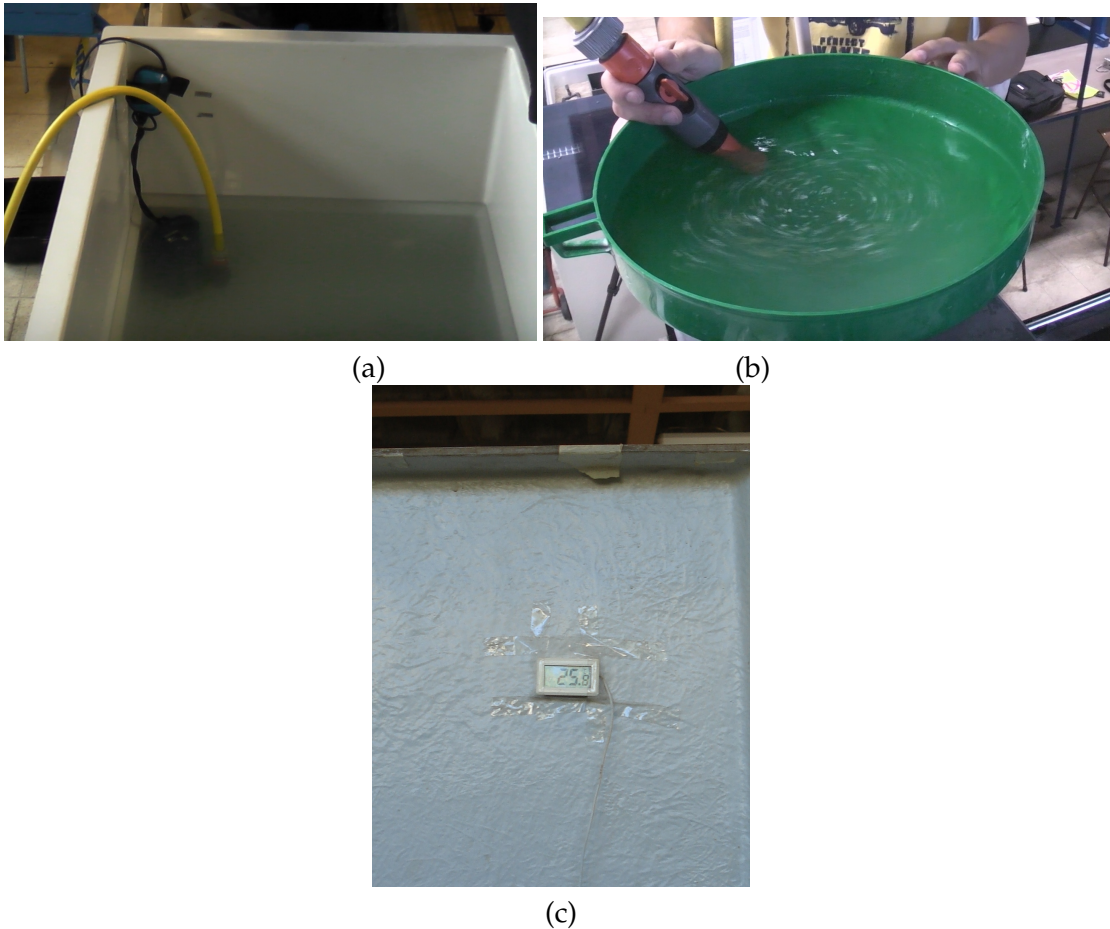


Figura 4.6: a) Bomba submersível colocada no tanque de mistura; b) processo de abastecimento do funil; c) termómetro digital.

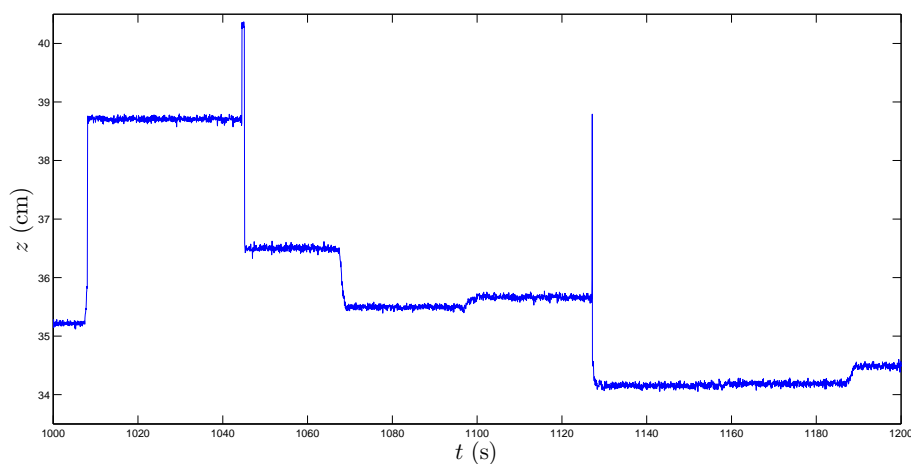
permanece no ponto medido originando um patamar que identifique a cota (Figura 4.7).

## 4.3 Tratamento de dados

### 4.3.1 Velocidades instantâneas

O processo de tratamento de dados foi dividido em duas fases. A primeira fase consiste na determinação do campo de velocidades instantâneo e validação de resultados com recurso ao *software* DynamicStudio<sup>®</sup>. Este processo tem como metodologia a escolha da dimensão da janela, tipo de correlação e método de validação de resultados.

Com base nos critérios descritos na seção 3.4.3 e tendo em atenção que correntes de densidade apresentam gradientes de velocidade consideráveis gerados principalmente pela camada limite inferior e pelo processo de mistura criado na interface dos dois fluidos, determinou-se que a dimensão da área de interrogação adequada seria de



(a)

Figura 4.7: Representação gráfica do processo de medição da topografia.

16x16 pixels. O tipo de correlação utilizado foi algoritmo *adaptive-correlation* porque apresenta resultados credíveis na medida em que estima o sentido do escoamento e o deslocamento médio para áreas de interrogação pequenas e partículas traçadoras insuficientes (Simão et al., 2009). Foram realizados três processos iterativos com uma redução progressiva da dimensão da área de interrogação (128x128 pixels, 32x32 pixels e 16x16 pixels). A dimensão final da área de interrogação permite adquirir um mapa de velocidade instantânea com resolução espacial de 199x149 pixels. O método de validação de resultados escolhido foi a mediana local por apresentar maior eficácia (secção 3.4.3).

A segunda fase consistiu na calibração e posicionamento do campo de velocidades, definição da zona visível de escoamento e validação de dados adquiridos pelo *software* DynamicStudio<sup>®</sup>. Tal como foi referido na secção 3.4.3 o sistema PIV estima deslocamentos a partir de um par de imagens composto por uma matriz de sensores, designados por pixels. Logo é necessário converter os dados para a unidade do Sistema Internacional (SI) de deslocamentos através da multiplicação do fator de calibração. Este é determinado através da imagem registada do objeto graduado no processo de calibração da câmara CCD, onde identificamos a distância entre dois pontos (Figura 4.8 a)). O fator de calibração,  $f_{cal}$ , é dado por:

$$\Delta d_m = f_{cal} \times \Delta d_p \quad (4.2)$$

onde  $\Delta d_m$  e  $\Delta d_p$  representam a distância entre dois pontos em metros e em pixels, respetivamente. A Tabela 4.4 apresenta os fatores de calibração para cada ensaio.

## CAPÍTULO 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO DE DADOS

Tabela 4.4: Fator de calibração ( $\times 10^{-5} m/pixel$ ).

	R1	R2	S1	S2
P1	6.862	6.969	6.790	6.899
P2	6.836	6.926	6.874	6.930

De forma a facilitar a comparação entre ensaios é necessário posicionar o campo de velocidades em relação ao eixo referencial ( $x$ , eixo longitudinal e  $z$ , eixo vertical). O posicionamento segundo o eixo vertical é realizado com base numa imagem registada que identifica que o pixel mais brilhante está a uma determinada distância do fundo do canal, através da utilização de um varão de ponta cónica iluminado pela folha de luz (Figura 4.8 b)). Em relação ao eixo longitudinal o posicionamento é definido através da medição dos limites laterais da imagem em relação ao sistema de alimentação, através de uma fita métrica colocada ao longo do canal.

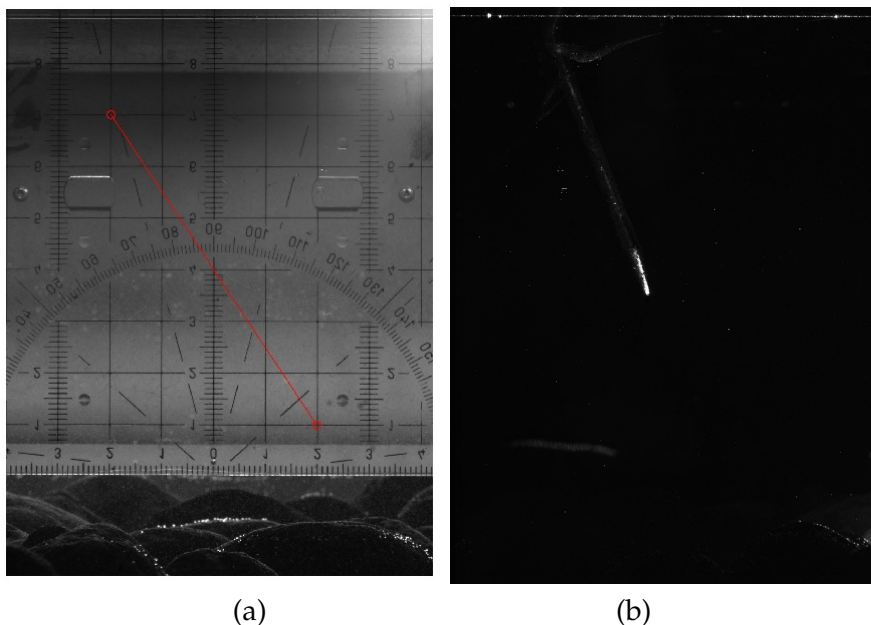


Figura 4.8: Exemplo de registo de imagem para o ensaio R1 posição P1: a) imagem do objeto graduado; b) imagem do ponteiro (neste caso o ponteiro encontra-se a 9.87 cm).

Para iniciar o cálculo e análise das variáveis hidrodinâmicas é necessário limitar a área visível do escoamento. Este processo consiste em mascarar os dados que não devem ser contabilizados como resultado. A Figura 4.9 mostra um exemplo onde a região a vermelho são dados que não são considerados como resultados.

A validação da base de dados baseia-se na metodologia utilizada em dados medidos



Figura 4.9: Exemplo de imagem mascarada para o ensaio R1 posição P1.

pelo sistema *Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)*, desenvolvida por Goring e Nikora (2002), designada por *Phase-Space Thresholding*. É um processo iterativo, onde é formada uma elipsóide com base na velocidade instantânea, primeira e segunda derivada da velocidade instantânea. Os resultados que encontram-se fora da elipsóide são considerados como errôneos e serão substituídos (Figura 4.10).

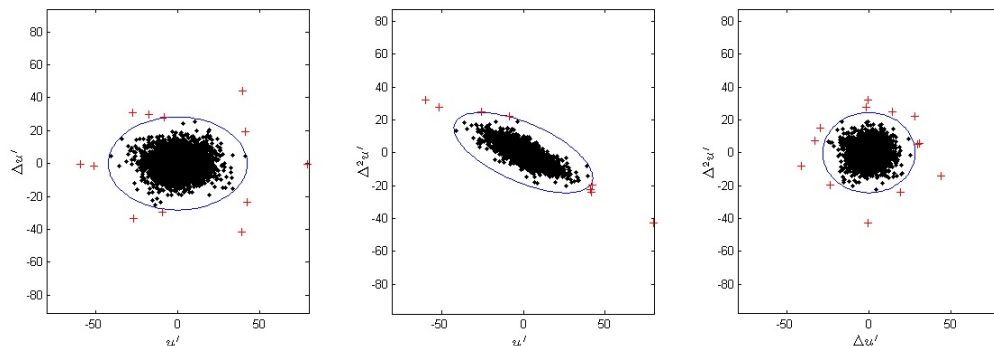


Figura 4.10: Exemplo de validação de dados com recurso ao método *Phase-Space Thresholding* para o ensaio R1 posição P1.

### 4.3.2 Função de vazios

O estudo de correntes de densidade apresenta um considerável grau de dificuldade devido à sua complexa estrutura interna. Neste sentido, e de forma a facilitar a interpretação dos resultados foram definidas quatro zonas distintas (Figura 4.11):

- Zona A: representa a área entre o plano da cota mais baixa do leito (da zona de medição) e o plano da cota mais alta do leito;
- Zona B: a área ocupada pelo fluido de densidade,  $\rho_i$ ;

- Zona C: a área da camada de mistura;
- Zona D: a área ocupada pelo fluido ambiente,  $\rho_a$ .

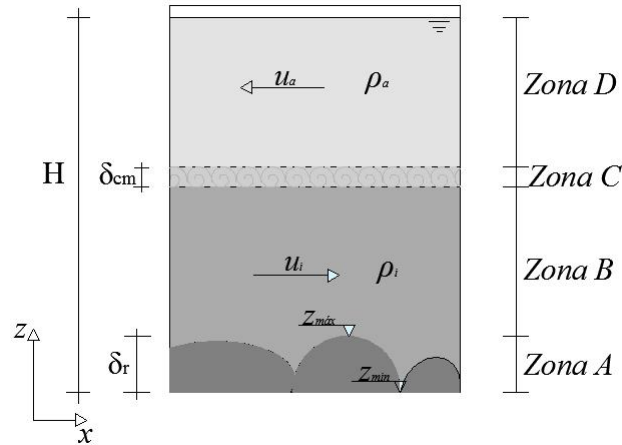


Figura 4.11: Representação esquemática das zonas do escoamento.

A zona C, comparativamente com as restantes zonas, é uma região de intensa turbulência originada pela troca de massa e quantidade de movimento entre o fluido ambiente e a corrente de densidade. A zona A é a região constituída por elementos da fronteira hidráulica fixa e pela corrente de densidade. Neste sentido, foram estudados dois tipos de função de vazios, função de vazios temporal para a zona C e função de vazios espacial para a zona A.

A determinação da função de vazios temporal,  $\psi_{temp}$ , tem como objetivo estimar a espessura da camada de mistura,  $\delta_{cm}$ . Como os ensaios focam-se apenas na medição das velocidades instantâneas admite-se que a interface entre fluidos localiza-se na posição em que a velocidade longitudinal é nula. A função de vazios temporal é determinada para cada instante e é dada por:

$$\psi_{temp} = \begin{cases} 1, & u_{i,j} \geq 0 \\ 0, & u_{i,j} < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

sendo  $u_{i,j}$  a velocidade longitudinal instantânea no ponto  $ixj$  do mapa de velocidades longitudinais.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram a área da camada de mistura para cada ensaio das posições P1 e P2 respetivamente.

Tal como foi explicado no capítulo 2.2, a espessura da camada de mistura do corpo de uma corrente de densidade depende da magnitude das instabilidades de

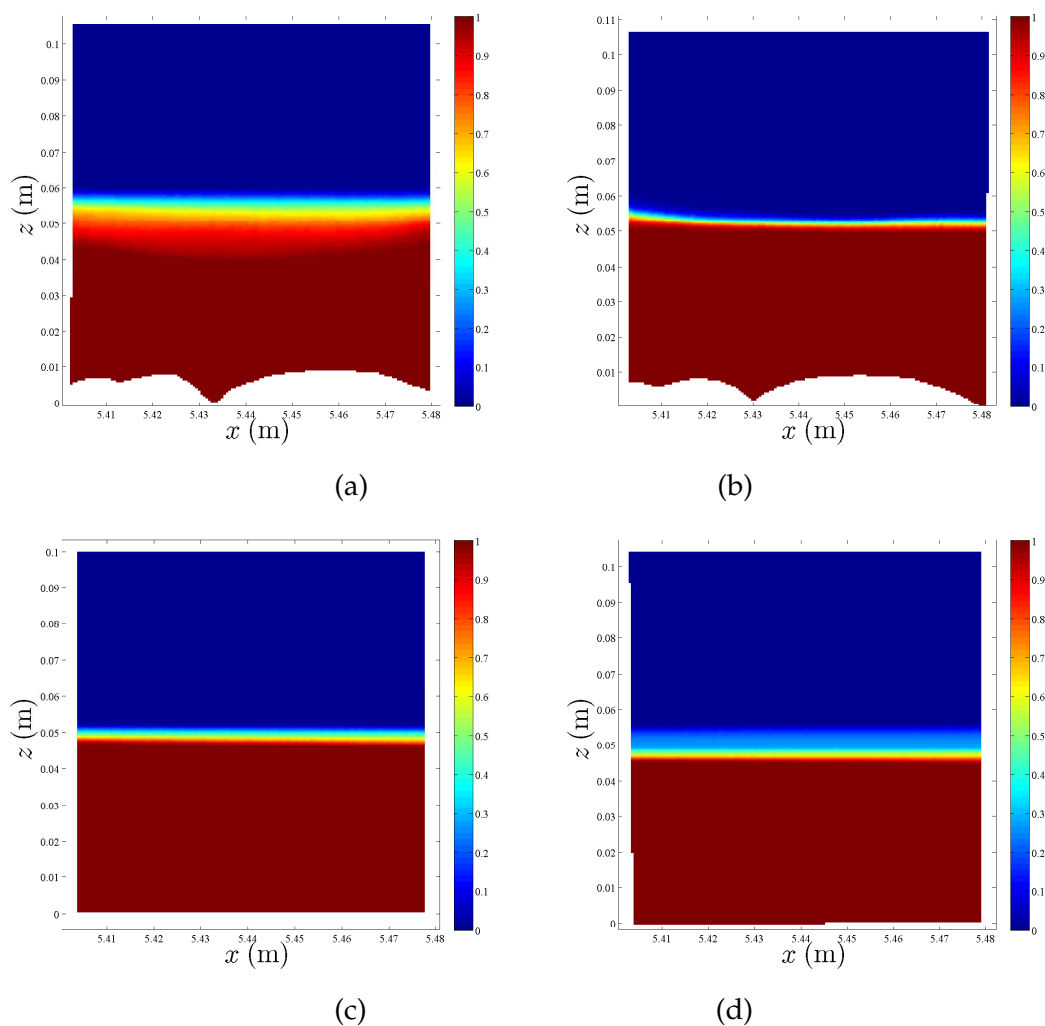


Figura 4.12: Mapas das funções de vazios temporais para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

Kelvin-Helmholtz, que por sua vez depende da diferença de velocidades entre os dois fluidos.

De uma forma geral, observa-se que a espessura da camada de mistura aumenta com o aumento do excesso de massa volúmica, à exceção do ensaio R1 e R2 da posição P1. Isto poderá indicar que as medições das velocidades instantâneas no ensaio R1 foram realizadas no instante em que a cabeça da corrente encontra-se na zona de medição, justificando a elevada intensidade turbulenta em comparação com os restantes ensaios.

Nas Figuras 4.14 e 4.15 apresenta-se a sobreposição dos perfis das funções de vazios temporais para os ensaios R1, R2, S1 e S2 das posições P1 e P2. O eixo vertical é normalizado através de uma grandeza comum, que é a altura total do escoamento (na

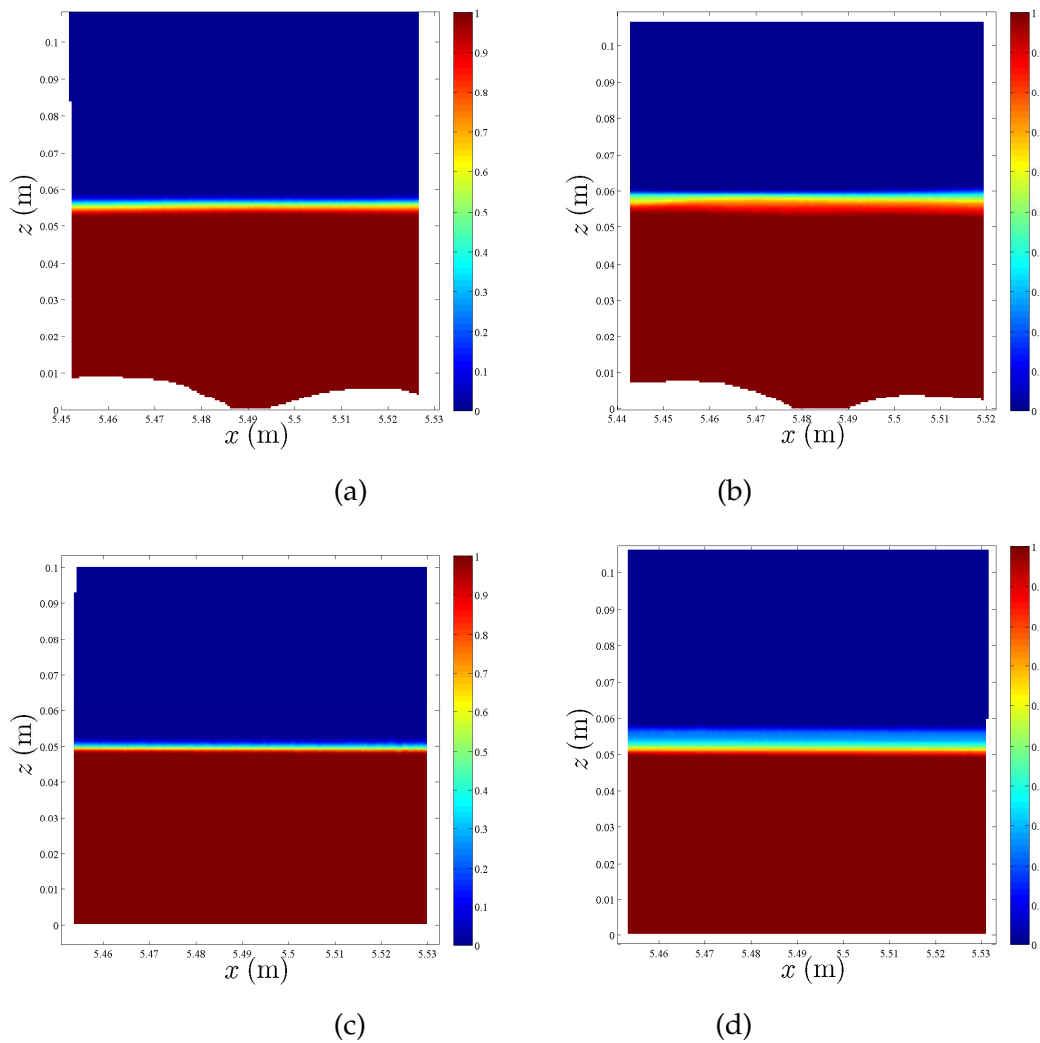


Figura 4.13: Mapas das funções de vazios temporais para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

zona de medição),  $H$ . A Tabela 4.5 apresenta os valores de  $H$  para cada ensaio.

Tabela 4.5: Parâmetro de adimensionalização,  $H$  (cm).

	R1	R2	S1	S2
P1	10.57	10.65	9.98	10.42
P2	10.83	10.66	10.00	10.74

A partir dos perfis da função de vazios temporal é possível obter a espessura da camada de mistura. Na Tabela 4.6 apresenta-se a espessura da camada de mistura,  $\delta_{cm}$ .



### 4.3. TRATAMENTO DE DADOS

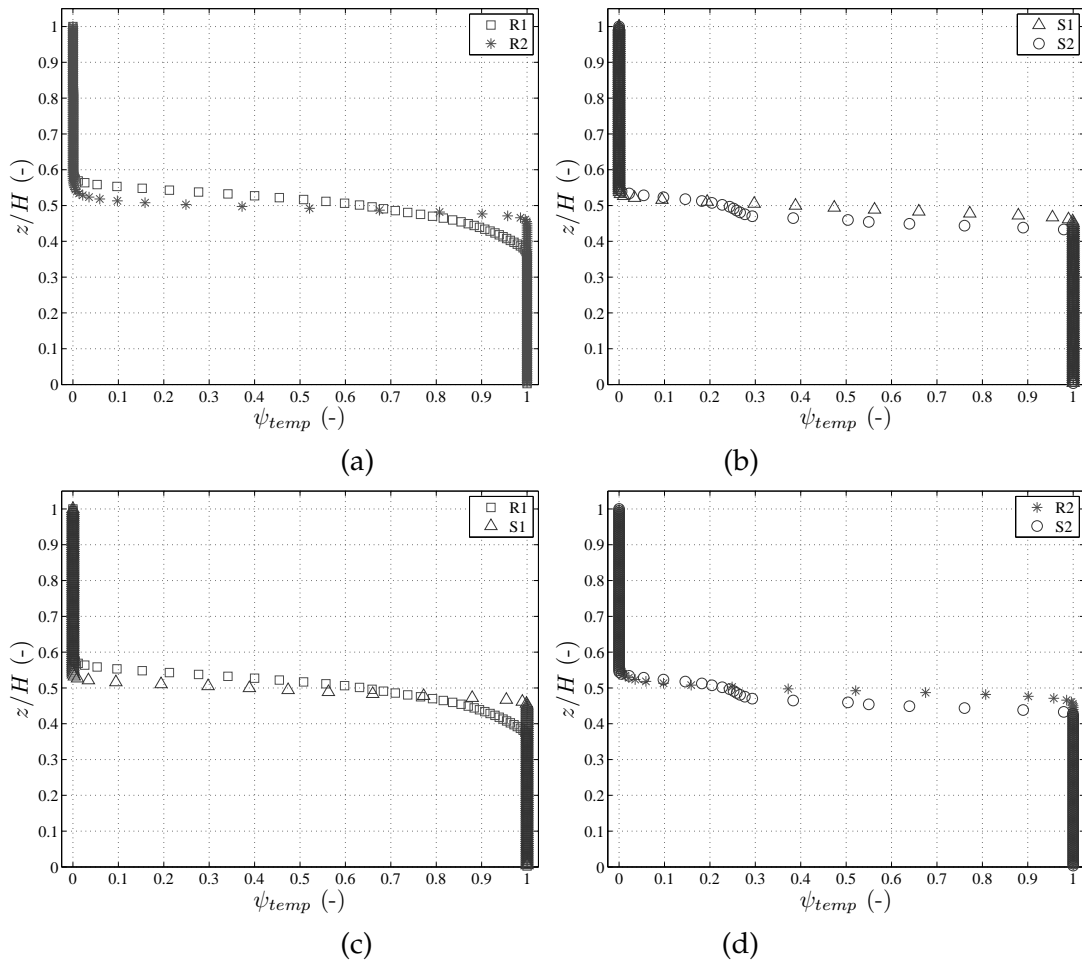


Figura 4.14: Sobreposição de perfis de funções de vazios temporais para a posição P1: a) ensaios R1 e R2; b) ensaios S1 e S2; c) ensaios R1 e S1; d) ensaios R2 e S2.

Tabela 4.6: Espessura da camada de mistura,  $\delta_{cm}$  (cm).

	R1	R2	S1	S2
P1	2.20	1.17	0.87	1.32
P2	0.82	0.94	0.71	1.05

Na Figura 4.14 e 4.15 a) e b), observa-se que a espessura da camada de mistura aumenta com o aumento do excesso de massa volúmica. Relativamente ao leito rugoso, verifica-se que o aumento da oscilação da fronteira diminui a espessura da camada de mistura (Figuras 4.14 a) e b) e 4.15 a) e b)). É de salientar que no geral, a espessura da camada de mistura diminui para jusante (por exemplo, ensaio R2 da posição P1 e P2), o que indica que poderá existir um amortecimento da turbulência para jusante (Tabela 4.6).

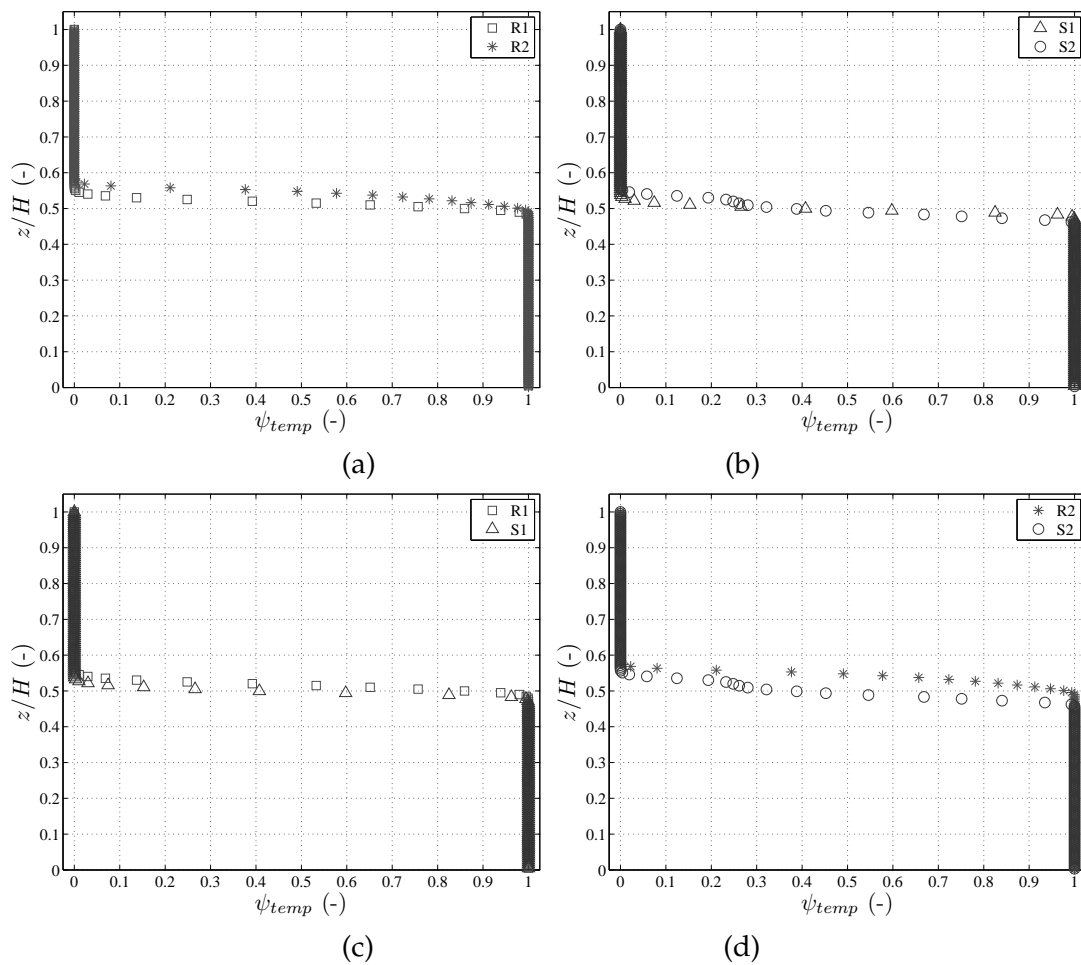


Figura 4.15: Sobreposição de perfis de funções de vazios temporais para a posição P2: a) ensaios R1 e R2; b) ensaios S1 e S2; c) ensaios R1 e S1; d) ensaios R2 e S2.

A função de vazios espacial,  $\psi_{esp}$ , representa a relação entre a área ocupada pelo fluxo ( $A_f$ ) e a área total do campo de medição ( $A_t$ ). É determinada para os ensaios de leito rugoso, com base no levantamento topográfico do leito (seção 4.2). Na Figura 4.16 apresenta-se a sobreposição dos perfis longitudinais da malha adquiridos com espaçamento de 7 cm, com uma extensão de 13 cm.

A Figura 4.17 mostra a sobreposição da distribuição vertical da função de vazios espacial para o ensaio R1 na posição P1, obtida pelo levantamento topográfico e pela máscara (Figura 4.9). Observa-se que na cota mais baixa do leito a função de vazios espacial obtida pelo levantamento topográfico tende para 0.4, sendo que a sua determinação depende do posicionamento da cota baixa em relação à zona de medição. Logo, a fronteira hidráulica apresenta uma dimensão de espaço vazio significativa que poderão influenciar a estrutura da corrente.

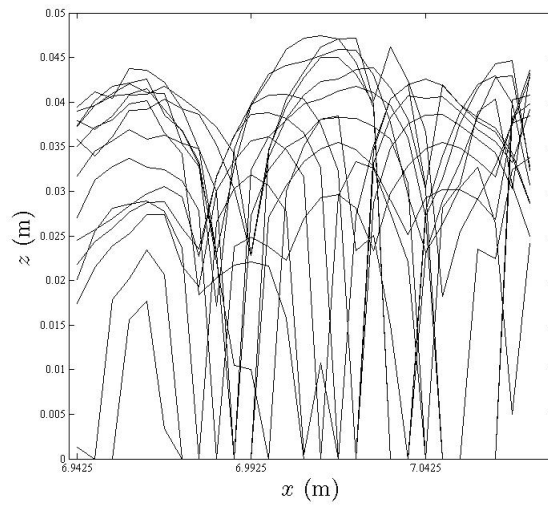


Figura 4.16: Sobreposição de perfis longitudinais da malha com uma extensão de 13 *cm*.

Na Tabela 4.7 apresenta-se a distância entre a cota mais baixa do leito e a cota mais alta,  $\delta_r$ , obtida pelo perfil vertical da função de vazios espacial para cada ensaio.

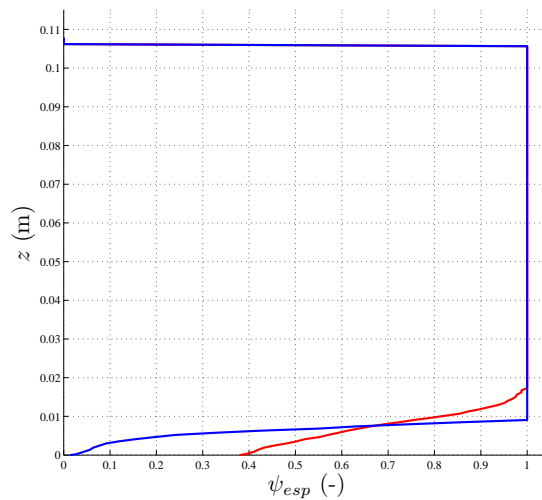


Figura 4.17: Sobreposição da função de vazios espacial obtida pelo levantamento topografico (-) e pela máscara (-)

Nas Figuras 4.18 e 4.19 mostra-se a sobreposição da distribuição vertical da função de vazios temporal e da função de vazios espacial obtida pela máscara para o conjunto de ensaios das posições P1 e P2.

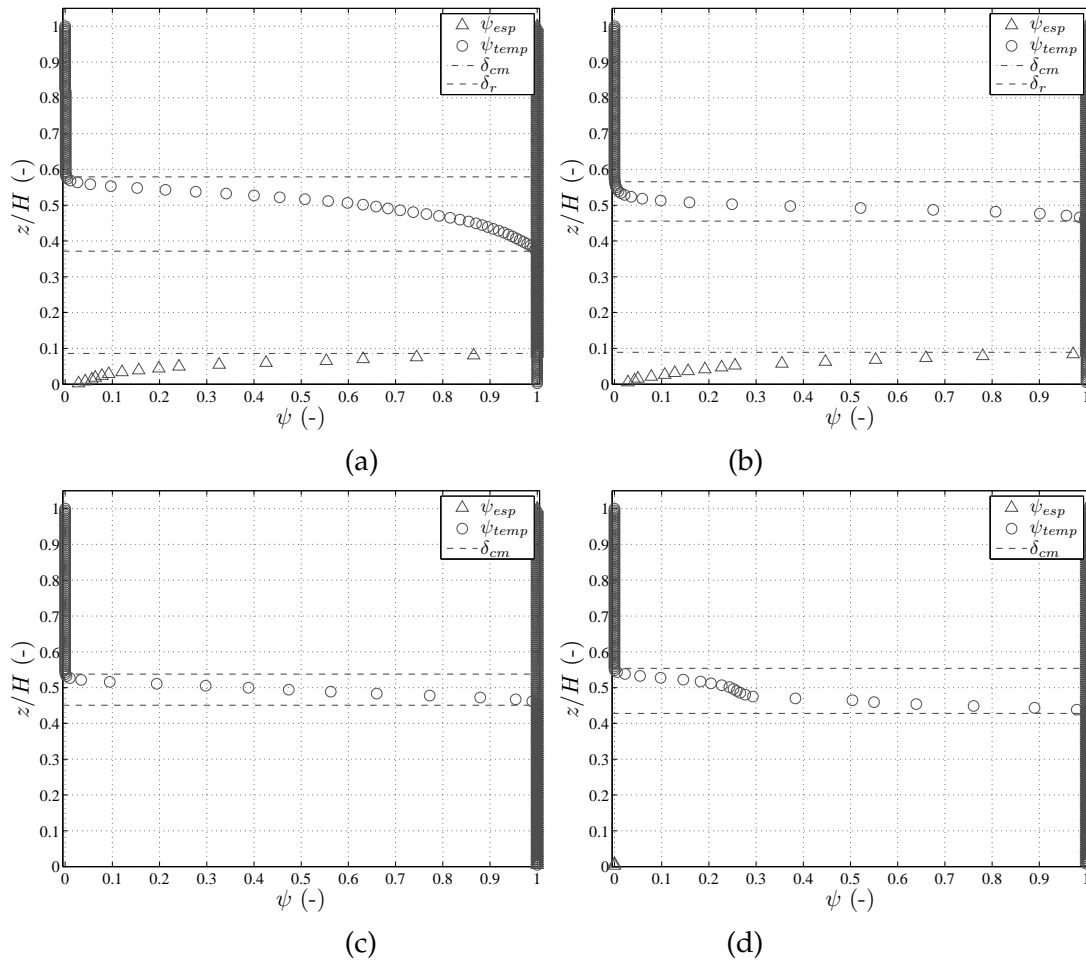


Figura 4.18: Sobreposição de perfis de funções de vazios temporais ( $\psi_{temp}$ ) e espacial ( $\psi_{esp}$ ) para a posição P1: a) ensaios R1; b) ensaios R2; c) ensaios S1; d) ensaios S2.

Tabela 4.7: Espessura da camada de superficial,  $\delta_r$  (cm).

	R1	R2
P1	0.91	0.95
P2	0.93	0.80

### 4.3. TRATAMENTO DE DADOS

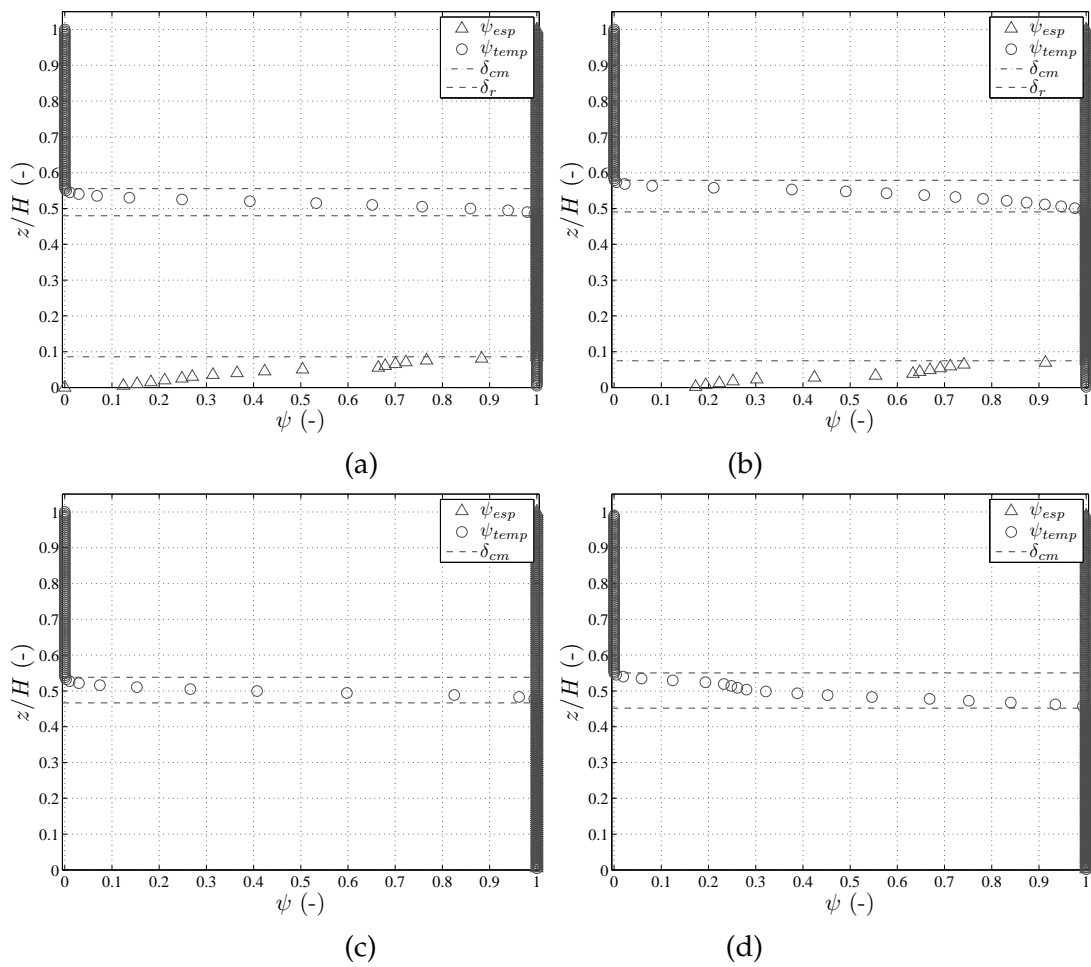


Figura 4.19: Sobreposição de perfis de funções de vazios temporais ( $\psi_{temp}$ ) e espacial ( $\psi_{esp}$ ) para a posição P2: a) ensaios R1; b) ensaios R2; c) ensaios S1; d) ensaios S2.



# Capítulo 5

## Análise e discussão dos resultados

### 5.1 Considerações gerais

No presente capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos no decorrer dos trabalhos experimentais. Inicialmente é feito um estudo ao escoamento médio temporal, onde se apresenta a metodologia de cálculo das variáveis hidrodinâmicas médias temporais, seguida de uma breve análise aos campos das variáveis hidrodinâmicas médias temporais e aos perfis das quantidades turbulentas médias no tempo dos ensaios nas posições P1 e P2. Posteriormente procede-se ao estudo do escoamento médio espacial e temporal, nomeadamente o procedimento da aplicação DAM, seguida de uma análise e descrição detalhada dos perfis de escoamento médio espacial e temporal dos ensaios R2 e S2 na posição P1, escolhidos de forma aleatória. Por fim é realizada uma análise dos perfis de escoamento médio, no tempo e no espaço, e dos parâmetros comuns de correntes de densidade do conjunto de ensaios da posição P1 e P2, com o objectivo de investigar a influência da rugosidade e do excesso de massa volúmica na estrutura interna da corrente salina.

### 5.2 Escoamento médio temporal

#### 5.2.1 Variáveis hidrodinâmicas médias temporais

Os campos de velocidades médias temporais,  $\bar{u}_i$ , são obtidos através da seguinte expressão:

$$\bar{u}_i(x, z) = \frac{1}{N_I} \sum_{i=1}^{N_I} u_i(x, z, t) \quad (5.1)$$

sendo,  $N_I$  o número de mapas instantâneos adquiridos, que correspondem ao número de pares de imagens adquiridas pelo sistema PIV (Tabela 4.2) e  $u_i$  a velocidade instantânea  $i$ . A Figura 5.1 representa uma série temporal da velocidade longitudinal da corrente de

## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

densidade, onde pode verificar-se que trata-se de fluxo *quasi*-permanente.

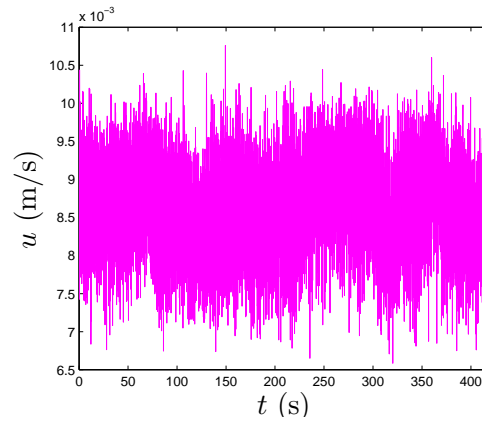


Figura 5.1: Série temporal da velocidade longitudinal do ensaio S1, posição P1.

A componente de vorticidade perpendicular ao plano de medição,  $\eta$ , é dada por

$$\eta(x, z) = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5.2)$$

onde,  $w$  e  $u$  é a velocidade vertical e longitudinal, respetivamente.

O algoritmo utilizado para estimar a vorticidade é proposto por Nogueira et al. (2012) e é dado pela seguinte equação:

$$\frac{\partial w}{\partial x}(x, z) = \frac{2w(x, z + 2) + w(x, z + 1) - w(x, z - 1) - 2w(x, z - 2)}{10\Delta x} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}(x, z) = \frac{2u(x + 2, z) + u(x + 1, z) - u(x - 1, z) - 2u(x - 2, z)}{10\Delta z} \quad (5.4)$$

onde  $\Delta x$  e  $\Delta z$  indica a distância média entre dois pontos adjacentes segundo a componente  $x$  e  $z$ , respetivamente. O campo de vorticidade média temporal,  $\bar{\eta}$ , é obtido de forma similar ao campo de velocidade média temporal (Equação 5.1),

$$\bar{\eta}(x, z) = \frac{1}{N_I} \sum_{i=1}^{N_I} \eta_i(x, z) \quad (5.5)$$

A tensão tangencial de Reynolds,  $\tau_{Re}$ , é dado por

$$\tau_{Re} = \rho \overline{u'w'} \quad (5.6)$$

sendo,  $u'$  e  $w'$  as velocidades de flutuação longitudinal e vertical, respetivamente, e  $\rho$  a massa volúmica do fluido. No presente trabalho não foi realizada a medição da densidade do escoamento, deste modo admitiu-se que,



$$\rho = \begin{cases} \rho_i, & \text{se } \bar{u}(x, z) \geq 0 \\ \rho_a, & \text{se } \bar{u}(x, z) < 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

O valor de  $\overline{u'w'}$ , é dado por:

$$\overline{u'w'}(x, z) = \frac{1}{N_I} \sum_{i=1}^{N_I} (u_i(x, z) - \bar{u})(w_i(x, z) - \bar{w}) \quad (5.8)$$

O conceito de covariância não enviesada de uma amostra finita,  $Cov_{u,w}$ , é representado por,

$$Cov_{u,w} = \frac{1}{N_I} \sum_{i=1}^{N_I} (u_i - \bar{u})(w_i - \bar{w}) \quad (5.9)$$

Logo  $\overline{u'w'}$  é dado por,

$$\overline{u'w'} = \frac{N_I - 1}{N_I} Cov_{u,w} \quad (5.10)$$

Conclui-se que as tensões tangenciais de Reynolds é dado por,

$$\tau_{Re} = \rho \frac{N_I - 1}{N_I} Cov_{u,w} \quad (5.11)$$

### 5.2.2 Descrição da distribuição de velocidades, vorticidade e tensões de Reynolds médias temporais

#### Velocidade longitudinal média temporal

Nas Figuras 5.2 e 5.3 mostra-se o campo de velocidades longitudinais médias no tempo do conjunto de ensaios das posições P1 e P2, com sobreposição do mapa de vetores de velocidade longitudinal média no tempo.

De uma forma geral, o escoamento é composto por duas regiões distintas, uma região que escoar sobre o fundo no sentido do escoamento e outra região próxima da superfície livre que se propaga no sentido oposto ao do escoamento. Este tipo de fluxo é característico de correntes de densidade de fundo. A mistura salina,  $\rho_i$ , ao invadir o fluido ambiente,  $\rho_a$ , de menor massa volúmica adquire uma velocidade de flutuação e provoca uma movimentação ao fluido ambiente no sentido oposto, satisfazendo a condição de continuidade.

Correlacionando o mapa de velocidades dos dois ensaios do leito rugoso (Figura 5.2 a) e b)) ou dos dois ensaios do leito liso (Figura 5.2 c) e d)) da posição P1, observa-se que o aumento da massa volúmica da corrente de densidade induz um aumento de velocidade.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

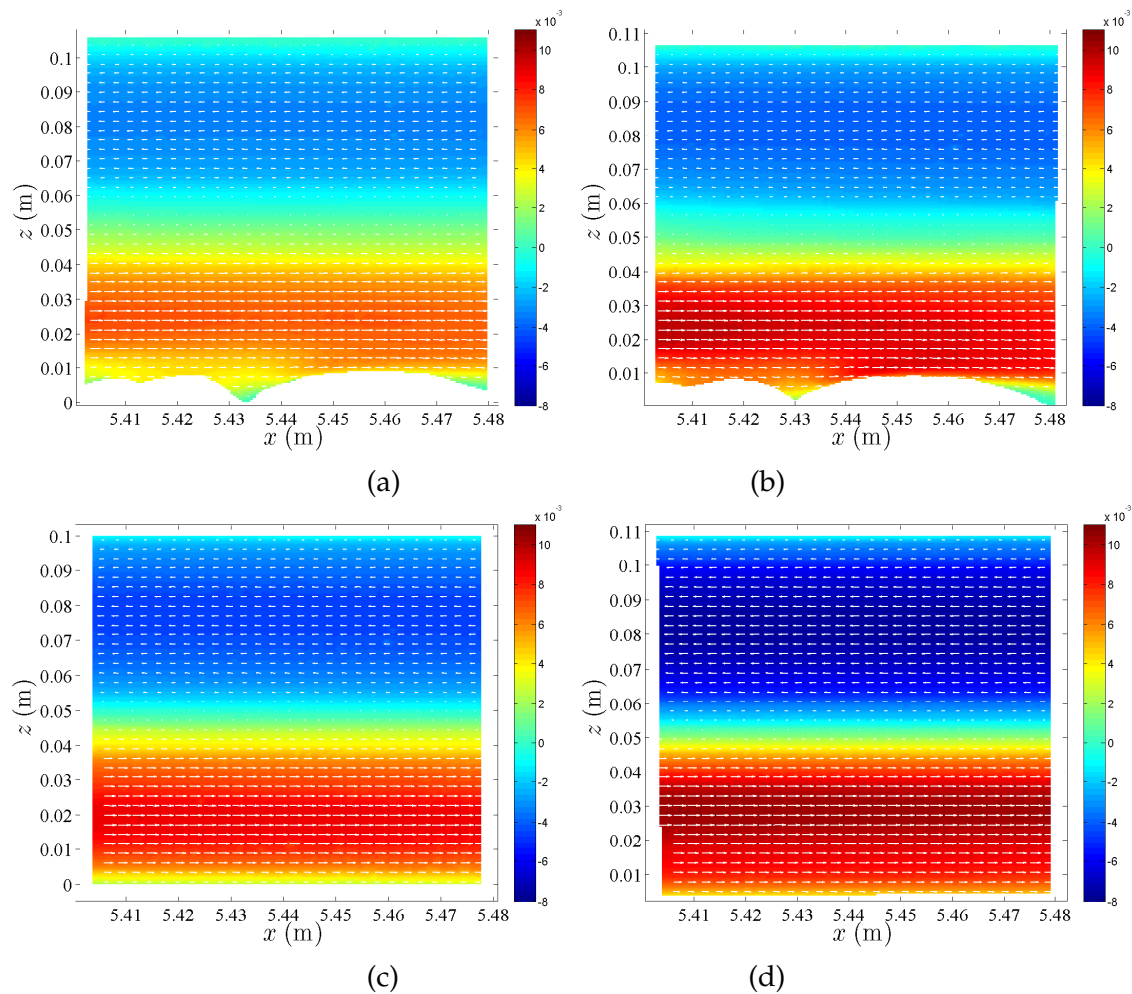


Figura 5.2: Mapa de velocidade longitudinal média temporal ( $m/s$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

Este incremento deve-se ao facto das correntes que se propagam sobre o mesmo tipo de leito irão estar sujeitas a condições de contorno no limite inferior similares, logo o incremento da força motriz que resulta da diferença de densidade entre os fluidos não será contrabalançado pelas forças de atrito no fundo originando uma aceleração da corrente. O aumento da velocidade de flutuação irá gerar um aumento da taxa de mistura de massa e quantidade de movimento na interface e, por conseguinte, um incremento da velocidade do fluido ambiente. Para além disso, verifica-se que correntes salinas com a mesma massa volúmica sofre uma redução de velocidade longitudinal com o aumento da rugosidade do leito, provocado pelo aumento da força de arrasto no fundo que irá retardar a velocidade do fluido (por exemplo, Figura 5.2 a) e c)). Também é notório a influência da camada rugosa sobre a distribuição das velocidades longitudinais, onde esta origina uma variabilidade espacial elevada junto ao leito (Figura 5.2 a) e b)), que não ocorre no caso do leito liso (Figura 5.2 c) e d)).

## 5.2. ESCOAMENTO MÉDIO TEMPORAL

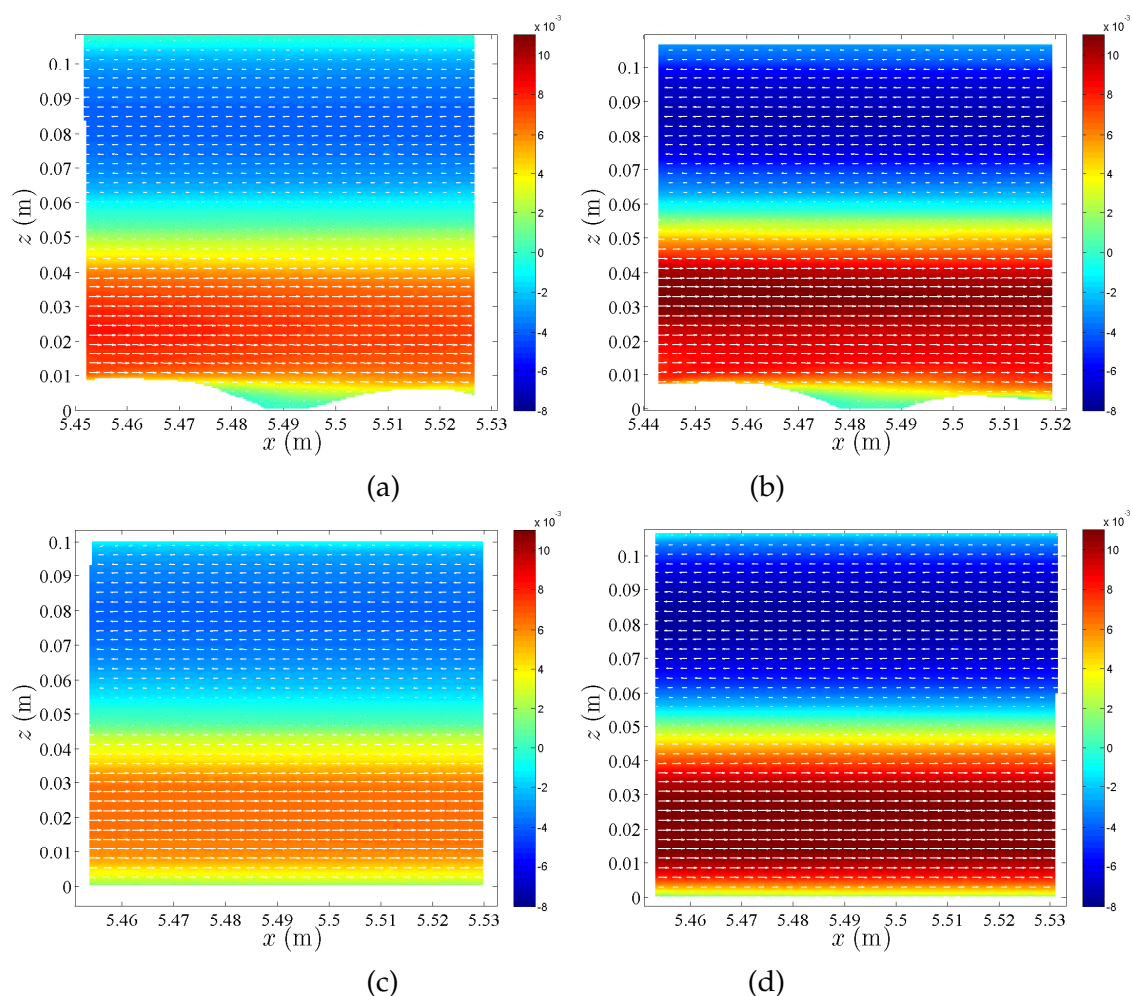


Figura 5.3: Mapa de velocidade longitudinal média temporal ( $m/s$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

Nos ensaios da posição P2 (Figura 5.3), verifica-se que a distribuição e a magnitude das velocidades longitudinais do escoamento são semelhantes aos ensaios da posição P1, à exceção da comparação entre o ensaio R1 e S1 (Figura 5.3 a) e c)). Observa-se que o ensaio R1 apresenta velocidade longitudinal de maior magnitude do que o ensaio S1, contrariando o efeito de redução de velocidade longitudinal originado pelo aumento das tensões de corte no leito. Tratando-se dum trabalho experimental existem diversos motivos que podem justificar o sucedido, como por exemplo o caudal do sistema de alimentação ou do sistema de drenagem não ser igual ao caudal dos restantes ensaios.

### Velocidade Vertical média temporal

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam o campo de velocidades verticais médias no tempo com sobreposição do mapa de vetores de velocidade longitudinal média temporal do conjunto de ensaios nas posições P1 e P2.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

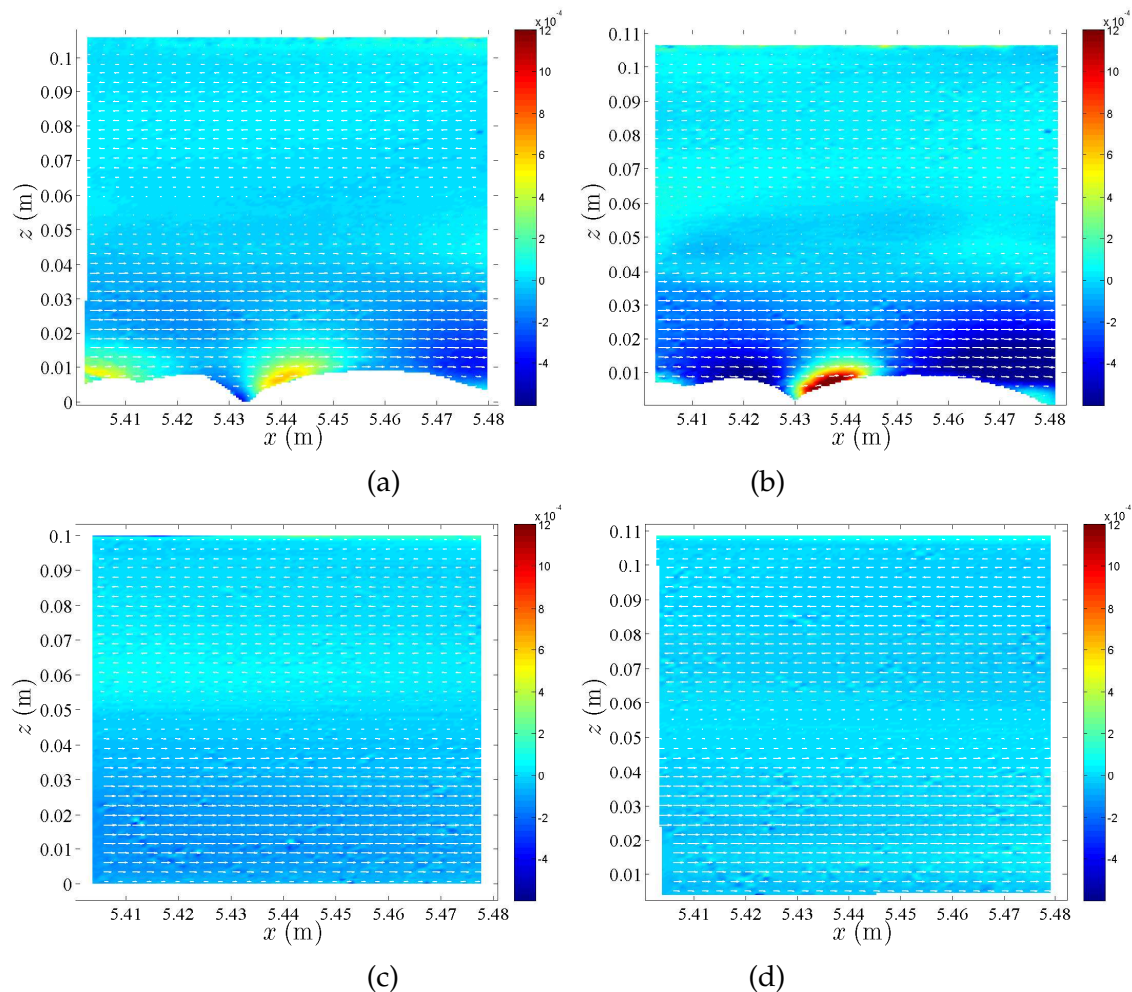


Figura 5.4: Mapa de velocidade vertical média temporal ( $m/s$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

Numa primeira análise, observa-se que o efeito da camada de rugosidade é novamente visível (Figura 5.4 e 5.5 a) e b)). A partir do mapa de velocidades verticais verifica-se que a forma do desenvolvimento do leito provoca diferentes tipos de perturbações, isto é, nos ensaios R1 e R2 na posição P1 existem duas regiões de magnitude elevada junto ao leito que apresentam propriedades diferentes. Na aproximação da crista do leito o escoamento sofre uma aceleração no sentido ascendente e após a passagem pela crista o escoamento adquire uma aceleração no sentido descendente. Estas regiões intensificam-se com o aumento do excesso de massa volúmica (Figura 5.4 a) e b)). No mapa de velocidades verticais média no tempo medidas na posição P2 verifica-se que ao contrário do que ocorre na posição P1 na aproximação da crista não existe uma aceleração no sentido ascendente (Figura 5.5 a) e b)). Logo, a corrente de densidade que se propaga sobre um leito rugoso sofre diversas perturbações que influenciam a corrente de forma diferente.

## 5.2. ESCOAMENTO MÉDIO TEMPORAL

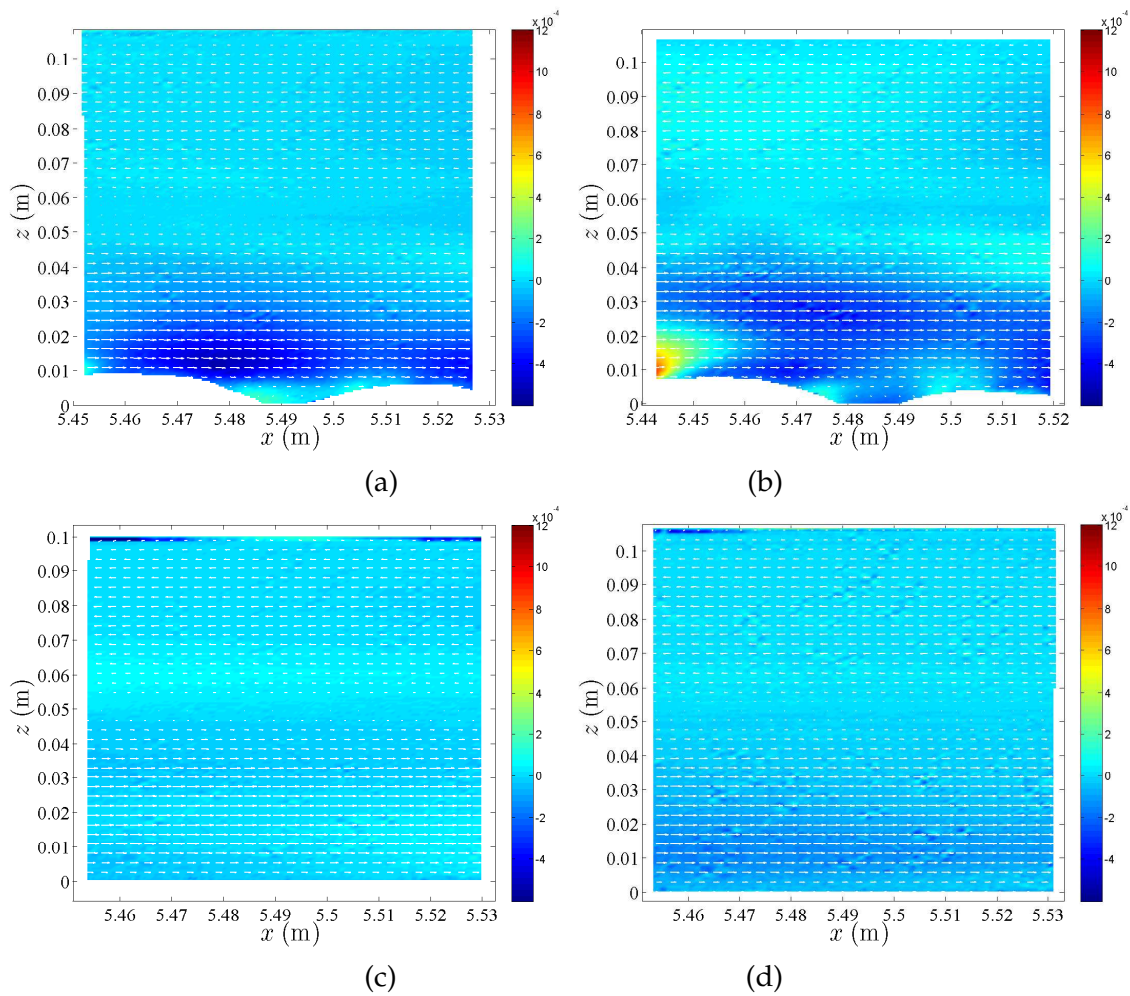


Figura 5.5: Mapa de velocidade vertical média temporal ( $m/s$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

No caso do leito liso, o campo de velocidades verticais apresentam uma variabilidade espacial fraca e valores negligenciáveis em comparação com as velocidades longitudinais (Figura 5.4 e 5.5 c) e d)).

### Vorticidade média temporal

Nas Figuras 5.6 e 5.7 apresenta-se a distribuição da vorticidade média temporal no escoamento, com sobreposição do mapa de vetores de velocidade longitudinal.

A vorticidade representa uma medida da rotação de um elemento do fluido no campo do escoamento, permitindo verificar se o escoamento é rotacional ou não. Escoamento rotacional ocorre na camada limite e na camada de mistura e está associado aos turbilhões resultante da força de arrasto gerada no fundo da corrente e na interface.



## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

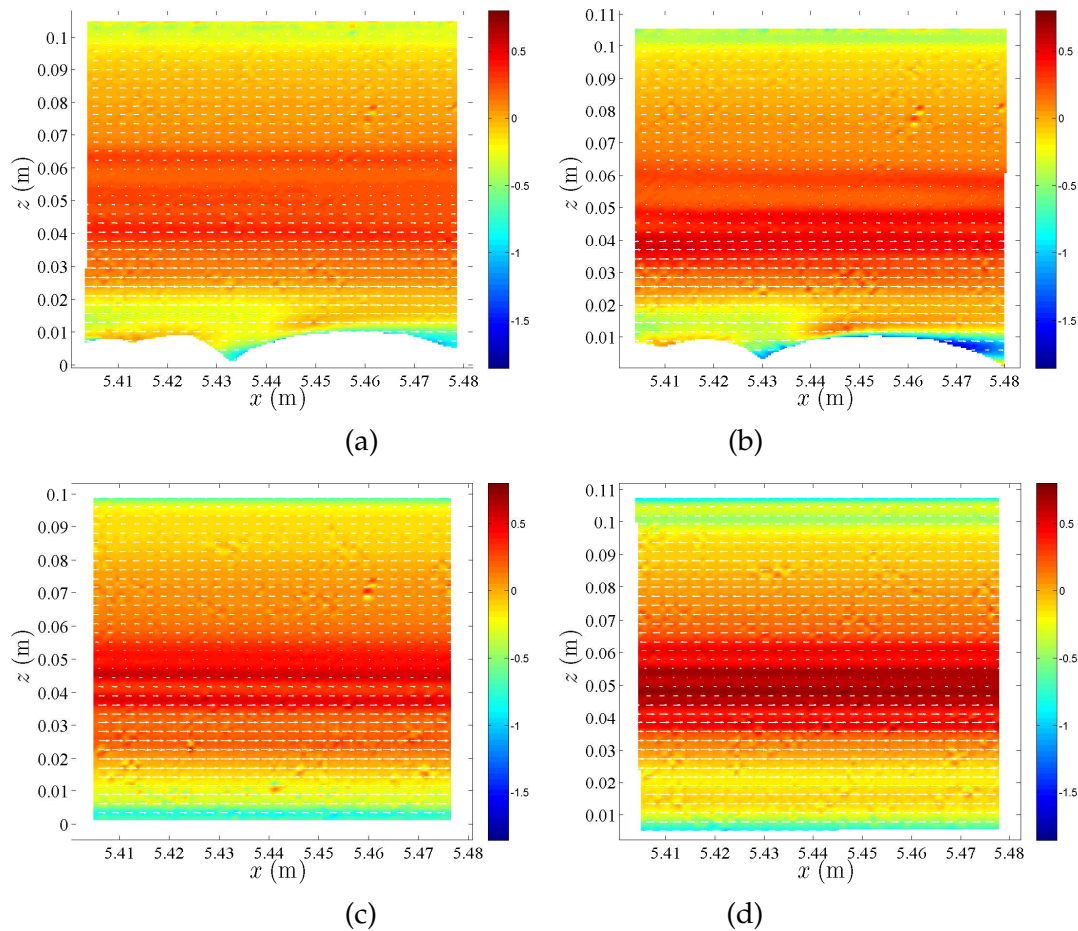


Figura 5.6: Mapa de vorticidade média temporal ( $s^{-1}$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

Através das Figura 5.6 e 5.7 observa-se vorticidade positiva na camada de mistura associada às instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Esta apresenta maior magnitude no caso do leito liso, e intensifica-se com o aumento da densidade. Junto ao fundo observa-se vorticidade negativa resultante da condição de não escorregamento, que aumenta com o aumento da densidade. Estas observações estão de acordo com a análise de Nogueira et al. (2012) no estudo da influência da camada rugosa sobre o desenvolvimento da corrente de densidade de volume finito. Nogueira et al. (2012) observam que vorticidade negativa perto do leito e vorticidade positiva na interface entre os dois fluidos reduz de magnitude com o aumento da rugosidade, e que a região de vorticidade positiva aumenta de espessura e diminui de intensidade com o aumento da rugosidade.

### Tensão normal longitudinal de Reynolds média temporal

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram o mapa de tensões normais longitudinais de Reynolds

## 5.2. ESCOAMENTO MÉDIO TEMPORAL

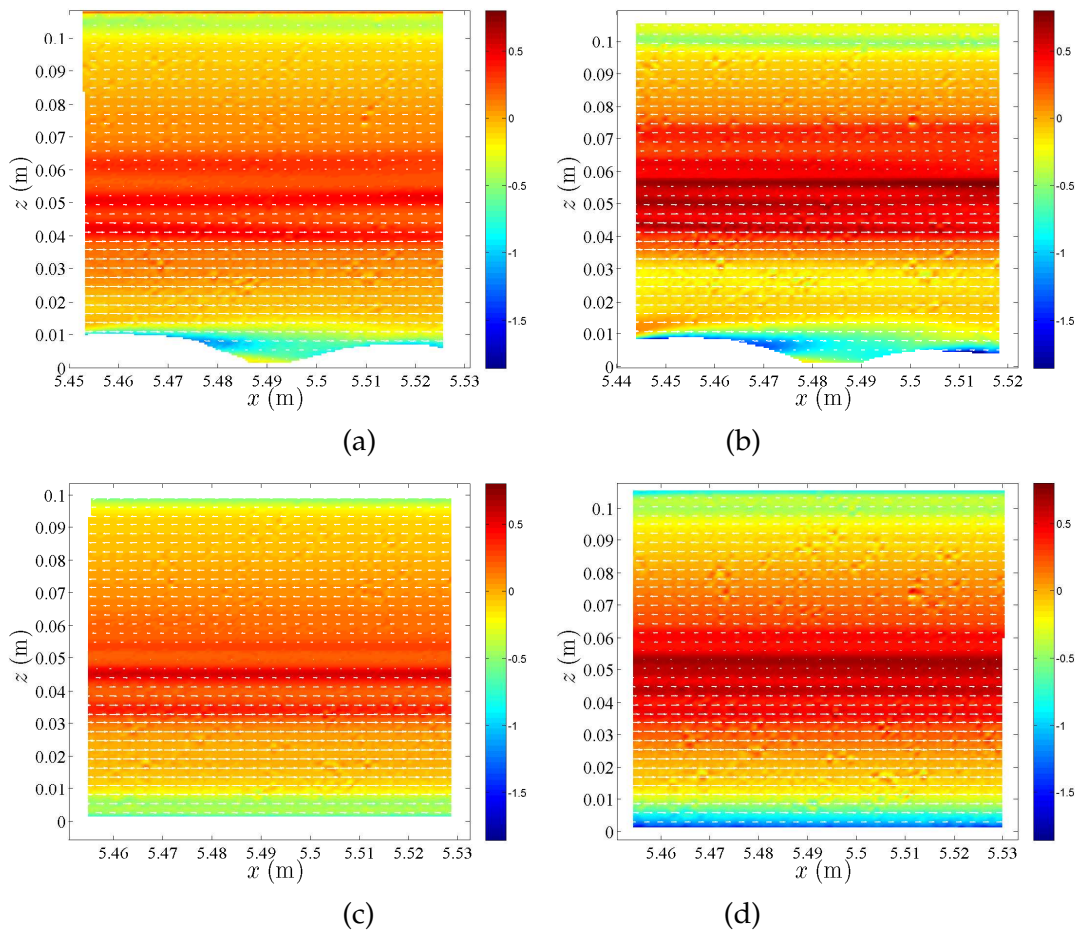


Figura 5.7: Mapa de vorticidade média temporal ( $s^{-1}$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

médias temporais para os dois conjuntos de ensaios relativamente às posições P1 e P2.

De uma forma geral, verifica-se que em todos os ensaios o mapa de tensões normais longitudinais de Reynolds apresenta uma elevada variabilidade espacial, o que poderá indicar que a transferência de massa e quantidade de movimento no escoamento contribui para a permanência de uma estrutura turbulenta da corrente de densidade. É de salientar que existem regiões em que as tensões normais longitudinais de Reynolds tendem para zero, indicando que a transferência de quantidade de movimento é inibida e, por conseguinte a turbulência é amortecida. Relativamente à influência do excesso de massa volúmica e da rugosidade do leito não é perceptível se estas contribuem para o desenvolvimento das tensões.

### Tensão normal vertical de Reynolds média temporal

Nas Figuras 5.10 e 5.11 apresenta-se o mapa de tensões normais verticais de Reynolds

## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

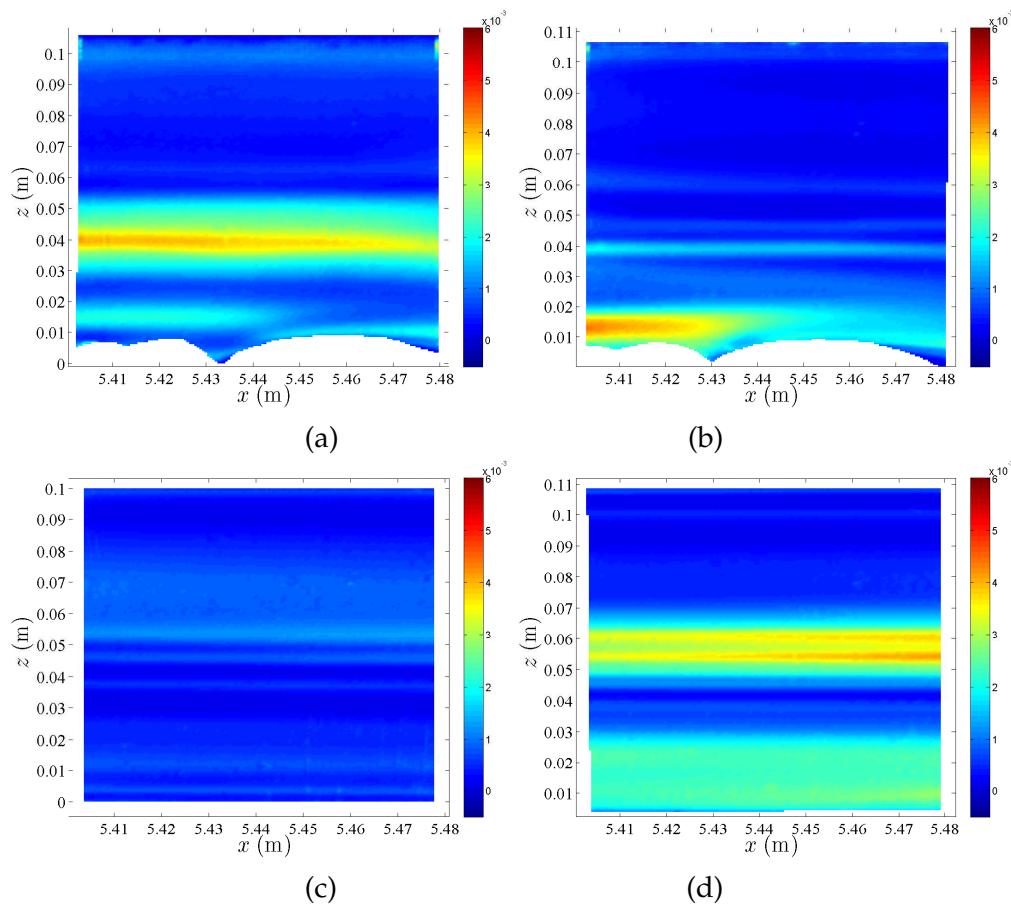


Figura 5.8: Mapa de tensão normal longitudinal de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

médias temporais para os dois conjuntos de ensaios relativamente às posições P1 e P2.

Numa primeira análise, verifica-se que o aumento da rugosidade contribui para desenvolvimento de tensões normais verticais de Reynolds junto ao leito, e que estas incrementam com o aumento do excesso de massa volúmica (Figura 5.10 e Figura 5.11 a) e b)). No caso dos ensaios do leito liso, o campo de tensão normal vertical de Reynolds apresenta valores negligenciáveis em comparação com os ensaios do leito rugoso (Figura 5.10 e Figura 5.11 c) e d)).

### Tensão tangencial de Reynolds média temporal

As Figuras 5.12 e 5.13 mostram o mapa de tensões tangenciais de Reynolds médias temporais para os dois conjuntos de ensaios relativamente às posições P1 e P2.

Relativamente ao conjunto de ensaios do leito rugoso (Figura 5.12 e 5.13 a) e b)) observa-se que junto ao leito surgem tensões tangenciais de Reynolds que intensificam-se



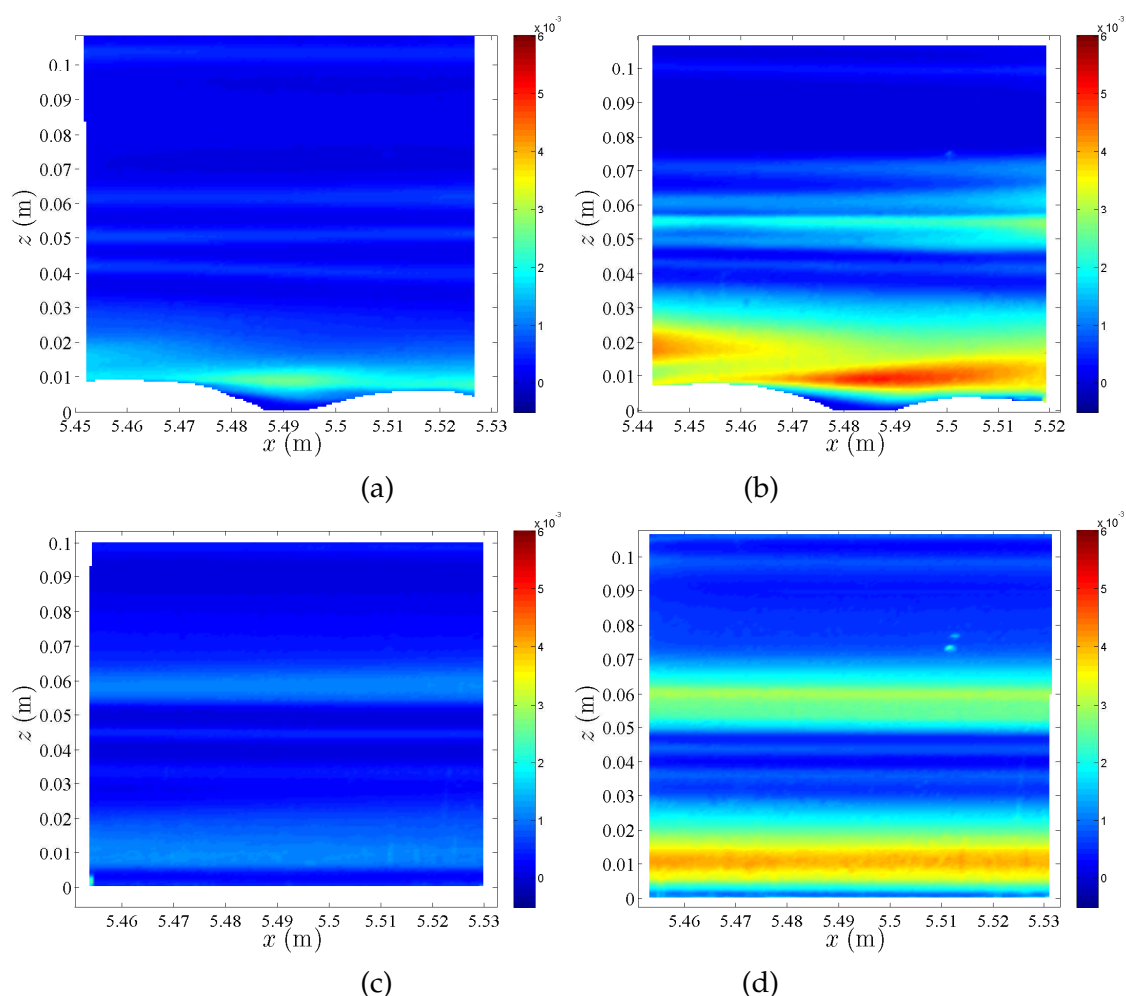


Figura 5.9: Mapa de tensão normal longitudinal de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

com o aumento da massa volúmica. É novamente notório que o desenvolvimento do leito influencia de forma diferente ao longo do escoamento, o que indica que a estrutura turbulenta apresenta uma elevada variabilidade temporal e espacial. É necessário salientar que embora as tensões de Reynolds sejam, geralmente, desprezáveis no caso do leito liso em comparação com o leito rugoso, existe um incremento destas com o aumento da densidade (Figura 5.12 e 5.13 c) e d)). É novamente visível o efeito da camada rugosa sobre a distribuição espacial das tensões tangenciais de Reynolds.

### 5.2.3 Análise dos perfis de escoamento médio temporal

Nesta seção pretende-se verificar se a aplicação da metodologia da dupla média (DAM) às variáveis hidrodinâmicas é o método mais adequada para descrever detalhadamente o comportamento hidrodinâmico de fluxo sobre fronteira rugosa.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

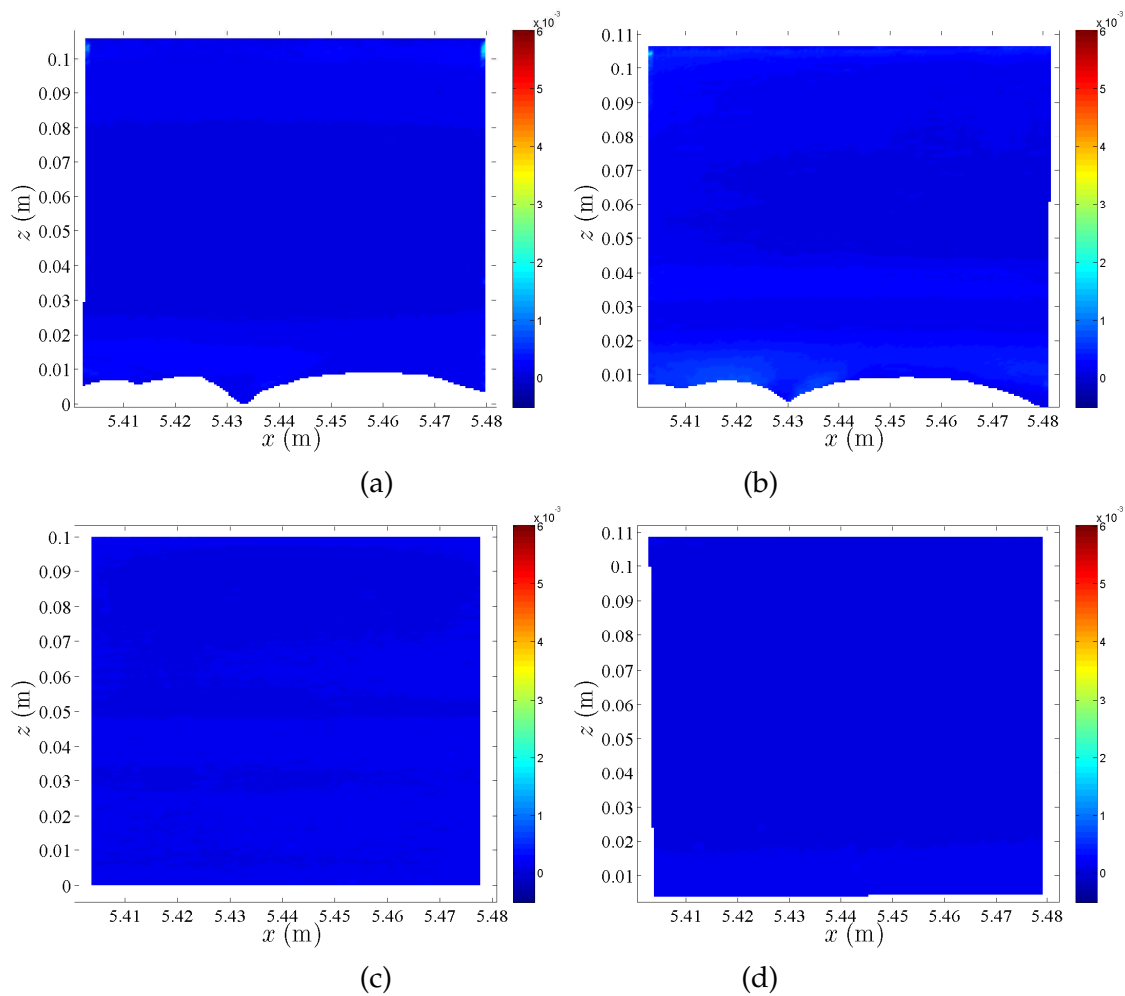


Figura 5.10: Mapa de tensão normal vertical de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

Da Figura 5.14 à Figura 5.17 apresentam-se os perfis médios temporais da velocidade longitudinal ( $\bar{u}$ ), velocidade vertical ( $\bar{w}$ ), tensão normal longitudinal de Reynolds ( $-\rho\overline{u'^2}$ ), tensão normal vertical de Reynolds ( $-\rho\overline{w'^2}$ ) e tensão tangencial de Reynolds ( $-\rho\overline{u'w'}$ ), para os ensaios do leito rugoso e leito liso na posição P1 e P2, respetivamente. A análise destes perfis tem como objetivo visualizar se a irregularidade da fronteira produz uma elevada heterogeneidade perto do leito, que possa por em causa a caracterização detalhada do escoamento através da média temporal. Tal como foi referido no Capítulo 2, quando o escoamento apresenta uma elevada heterogeneidade derivada dos elementos irregulares do leito a caracterização da produção de turbulência e da resistência ao escoamento através das propriedades locais médias temporais e de parâmetros que descrevem o leito torna-se um processo impraticável e inconveniente.

Numa primeira análise, verifica-se que o escoamento dos ensaios R1 e R2 apresenta elevada dispersão espacial junto ao leito em todas as quantidades turbulentas, que

## 5.2. ESCOAMENTO MÉDIO TEMPORAL

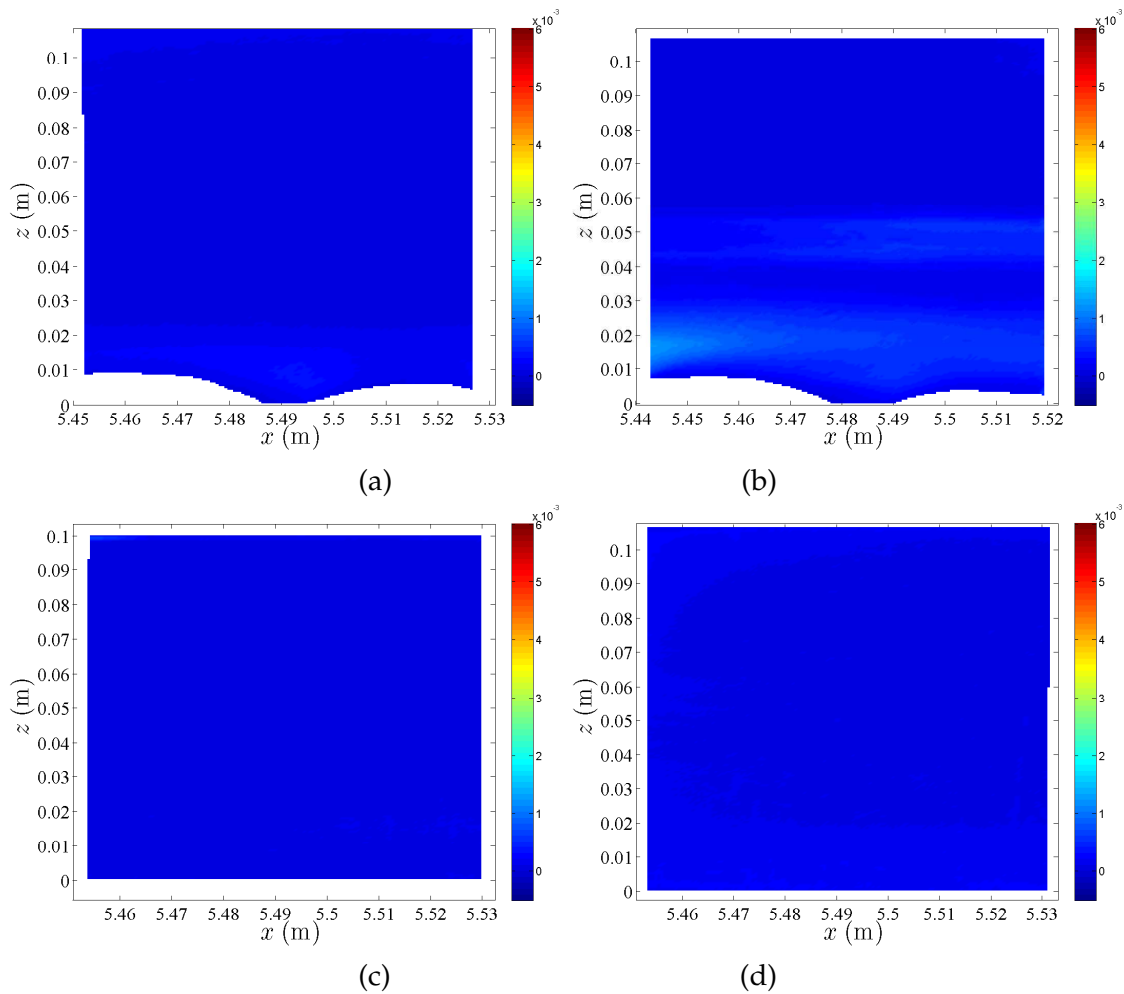


Figura 5.11: Mapa de tensão normal vertical de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

tende a diminuir com a altura do escoamento. É notório que a dispersão aumenta com o aumento da massa volúmica da mistura salina (Figuras 5.14 e 5.16). No caso dos ensaios S1 e S2 a dispersão dos perfis das quantidades turbulentas não tão intensa comparativamente com os ensaios de leito rugoso (Figuras 5.15 e 5.17). Torna-se assim evidente que a camada rugosa tem uma grande influência sobre a produção de turbulência e a resistência ao escoamento, o que torna a aplicação da metodologia DAM o método mais adequado para a descrição do comportamento hidrodinâmico do escoamento, permitindo a explicitação do termo relacionado com a forma do fundo e a intermitência da camada de mistura (termos dispersivos).

CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

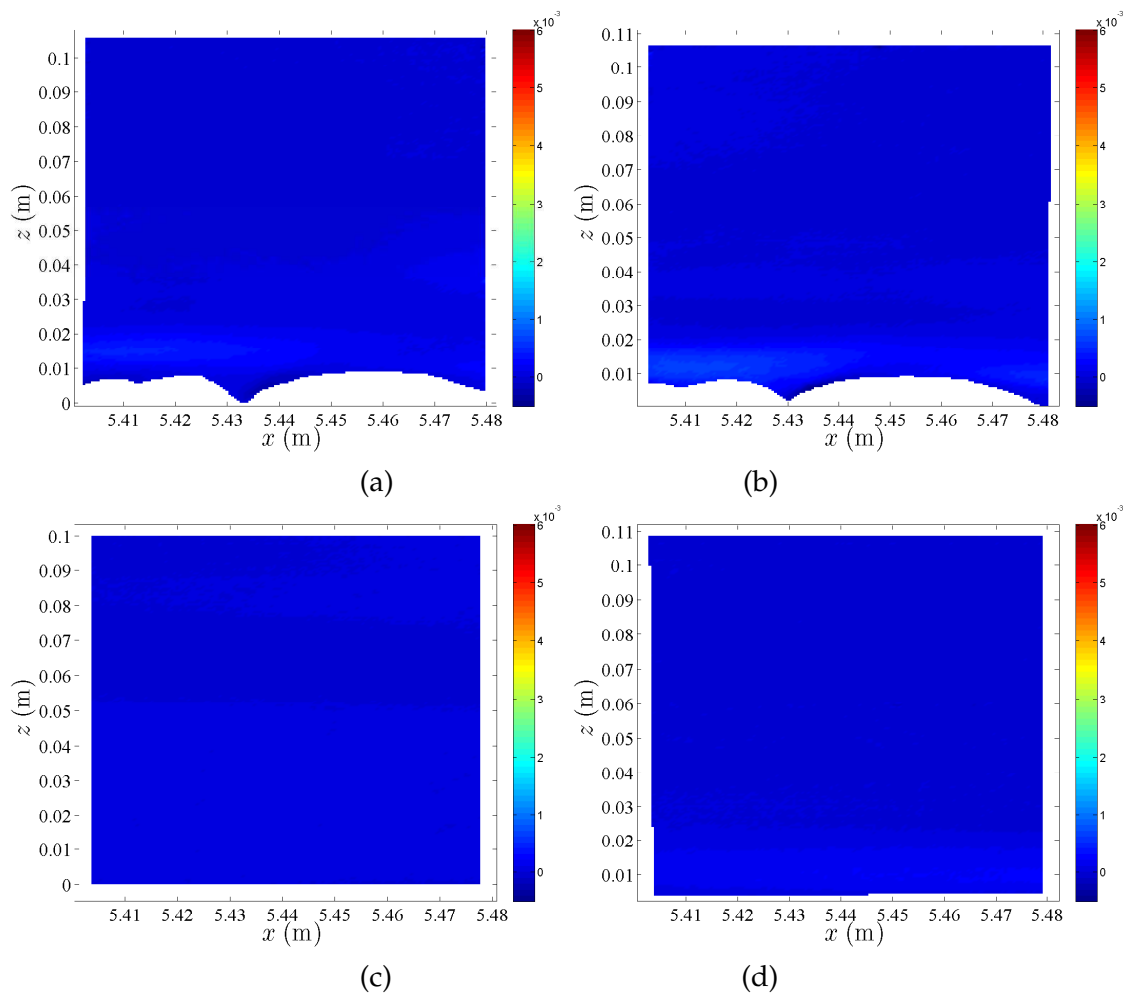


Figura 5.12: Mapa de tensão tangencial de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

## 5.2. ESCOAMENTO MÉDIO TEMPORAL

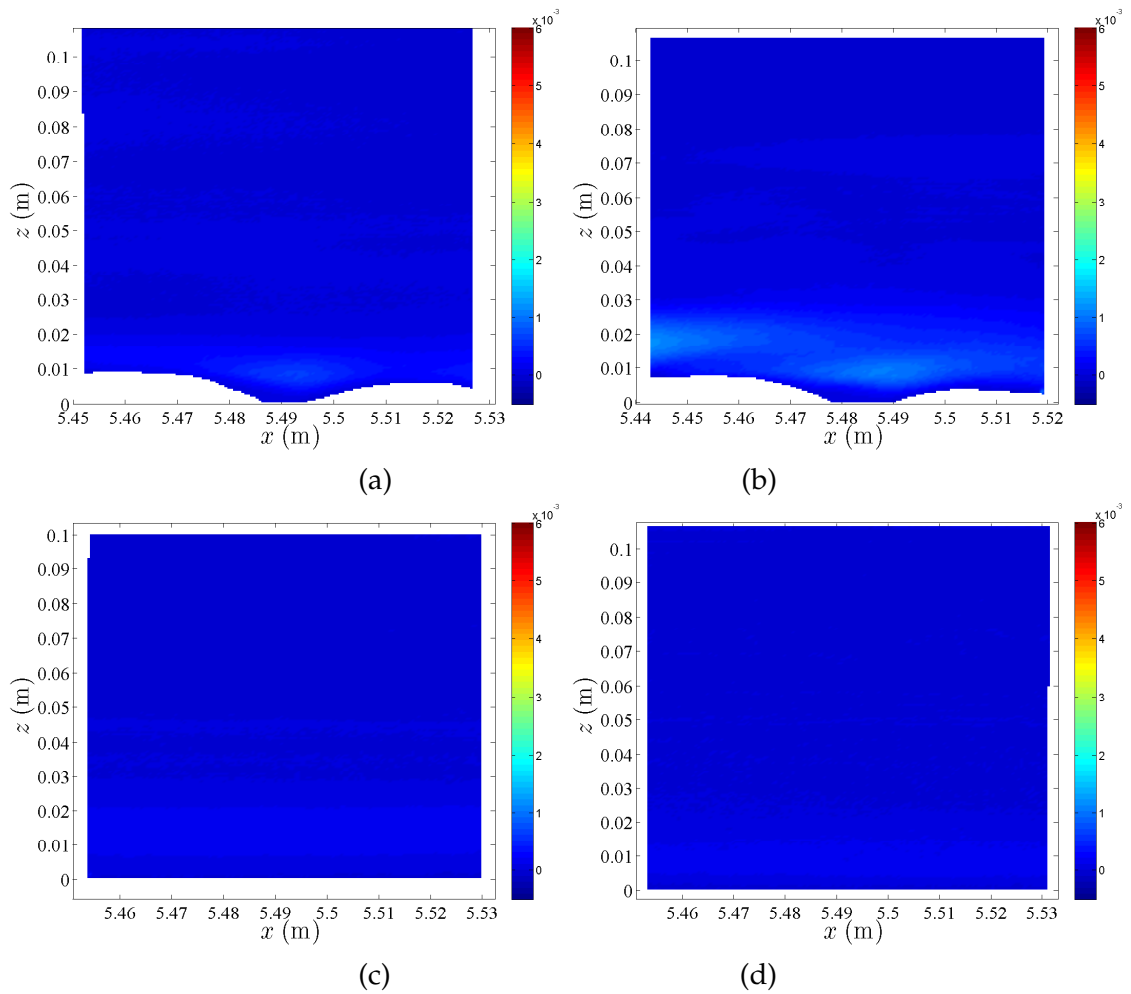


Figura 5.13: Mapa de tensão tangencial de Reynolds média temporal ( $Pa$ ) para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2; c) ensaio S1; d) ensaio S2.

CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

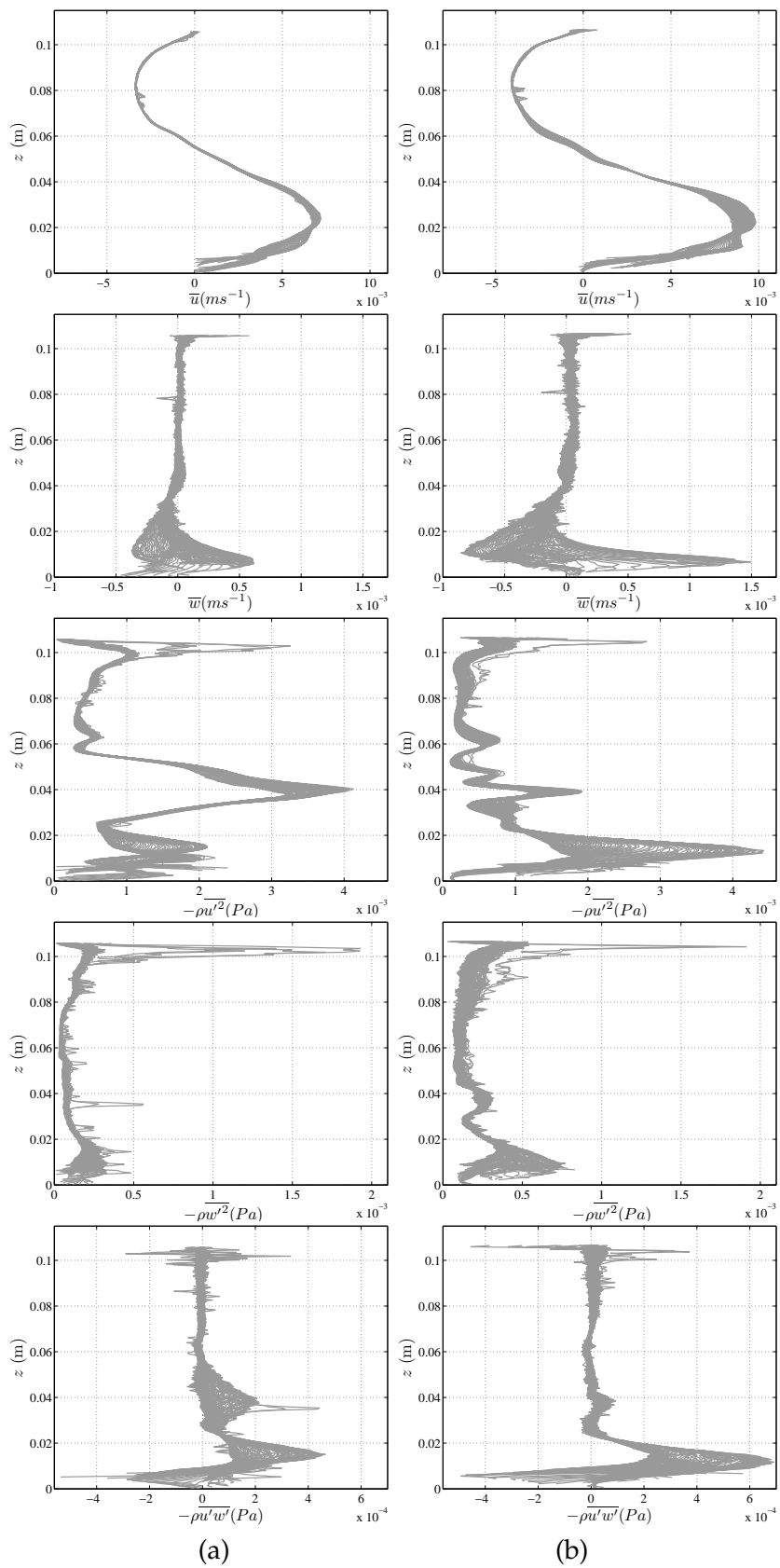


Figura 5.14: Perfis verticais das quantidades turbulentas médias temporais para a posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio R2.

## 5.2. ESCOAMENTO MÉDIO TEMPORAL

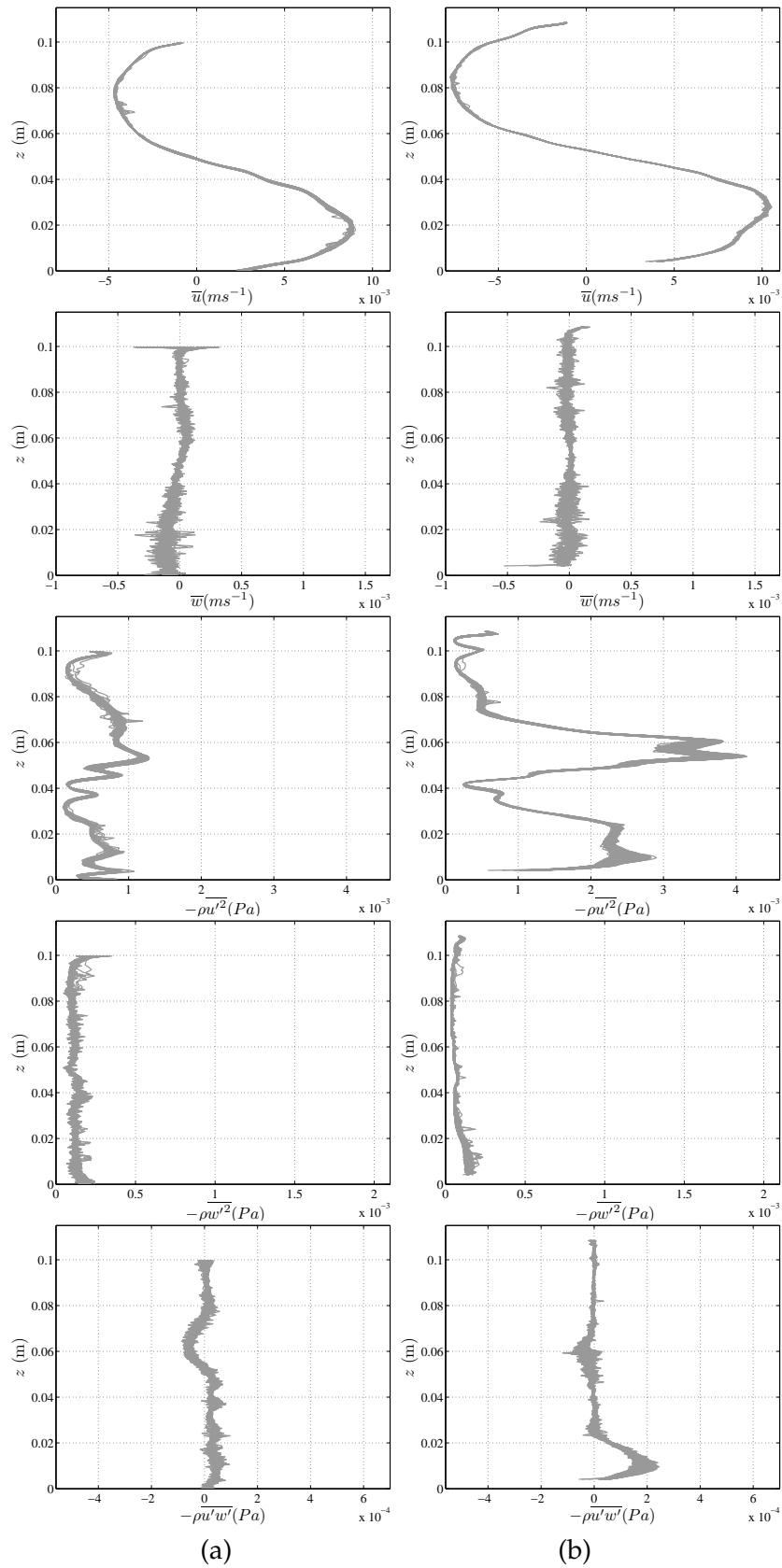


Figura 5.15: Perfis verticais das quantidades turbulentas médias temporais para a posição P1: a) ensaio S1; b) ensaio S2.

CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

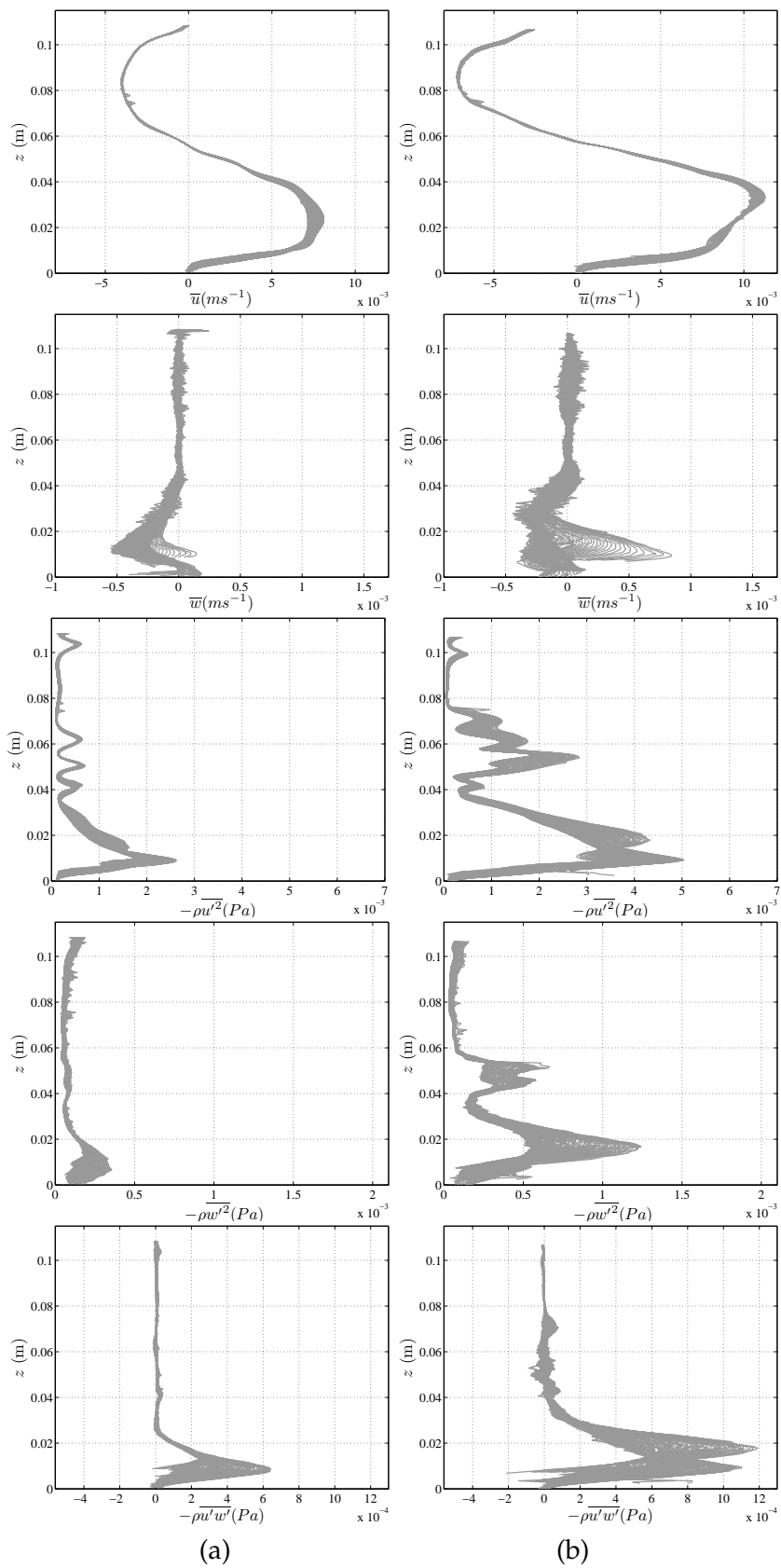


Figura 5.16: Perfis verticais das quantidades turbulentas médias temporais para a posição P2: a) ensaio R1; b) ensaio R2.



## 5.2. ESCOAMENTO MÉDIO TEMPORAL

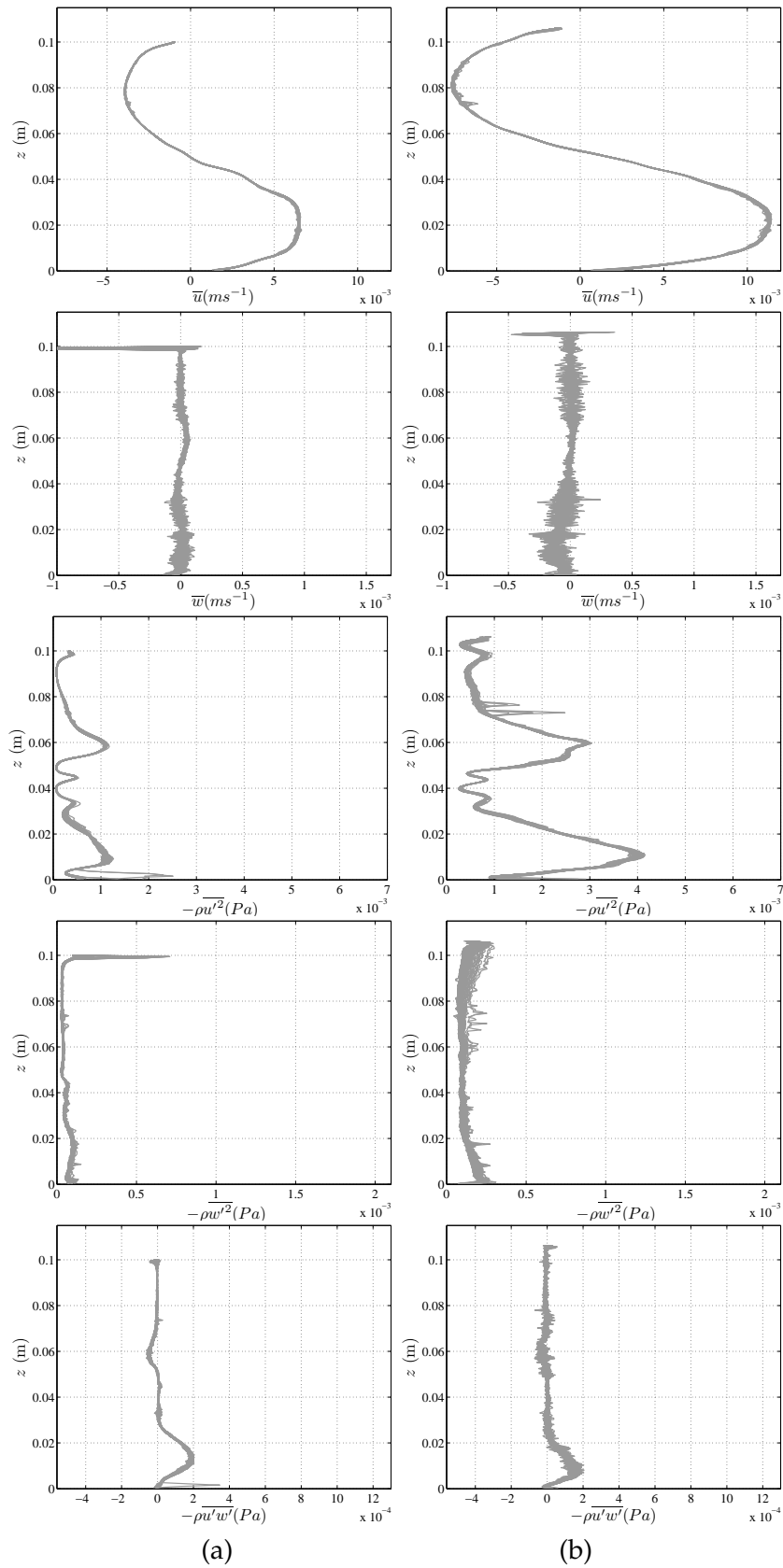


Figura 5.17: Perfis verticais das quantidades turbulentas médias temporais para a posição P2: a) ensaio S1; b) ensaio S2.

### 5.3 Escoamento médio espacial-temporal

#### 5.3.1 Variáveis hidrodinâmicas médias espacial-temporal

As variáveis hidrodinâmicas médias no tempo e no espaço são determinadas através da aplicação da definição da quantidade média espacial sobre a quantidade turbulenta média no tempo (Equação 2.21), que expressa em termos discretos vem (Ferreira et al., 2010; Franca et al., 2008)

$$\langle \bar{\theta} \rangle (z) \approx \frac{\sum_{k=1}^{N-N_0} \bar{\theta}_k(z) A_k(z)}{\sum_{k=1}^{N-N_0} A_k(z)} \quad (5.12)$$

em que  $A_k(z)$  é a área do subdomínio convexo  $\Omega_k$ , definida como a área de influência de  $(x_k, y_k) \in ]0, L_x[ \times ]0, L_y[$  e tal que  $\bigcup_{k=1}^{N(z)} \Omega_k = \Omega$ ,  $N$  o número total de subdomínios e  $N_0(z)$  o número de subdomínios à cota  $z$ , para o qual as variáveis do escoamento não estão definidas. Deve notar-se que  $\sum_{k=1}^{N-N_0(z)} A_k(z) < A$  para  $N_0(z) > 0$  e que  $A = L_x \times L_y$  é a área do domínio  $\Omega$  (Ferreira et al., 2010; Franca et al., 2008).

O procedimento de cálculo das médias espaciais utilizado no presente estudo baseia-se na metodologia utilizada por Ricardo (2008) no estudo de caracterização do escoamento turbulento em canais com vegetação emersa rígida. O processo consiste na definição da área de influência,  $A_k(z)$ , que diz respeito a cada um dos perfis médios temporais e é determinada pelo método de polígonos de Voronoï. A utilização deste método tem como objetivo identificar coordenadas de posições longitudinais que minimizem a ocorrência de fontes de erros no cálculo, e consiste na identificação de coordenadas com base na variabilidade espacial originada pela existência de hastes rígidas. Como no caso em estudo a variabilidade espacial é apenas originada pelos elementos rugosos optou-se por identificar coordenadas de pontos com intervalos iguais. Na Figura 5.18 apresenta-se um exemplo do diagrama de polígonos de Voronoï que identificam as áreas de influência para cada um dos 142 perfis médios temporais.

#### 5.3.2 Análise e descrição detalhada dos perfis de escoamento médio espacial-temporal

Nesta seção será analisada a estrutura interna da corrente salina através da descrição dos perfis das quantidades turbulentas médias (no tempo e no espaço) dos ensaios R2 e S2, na posição P1.

A Figura 5.19 apresenta o perfil vertical da velocidade longitudinal e vertical e da vorticidade, em que a quantidade turbulenta é normalizada pelo seu valor máximo absoluto (Tabela 5.1).

### 5.3. ESCOAMENTO MÉDIO ESPACIAL-TEMPORAL

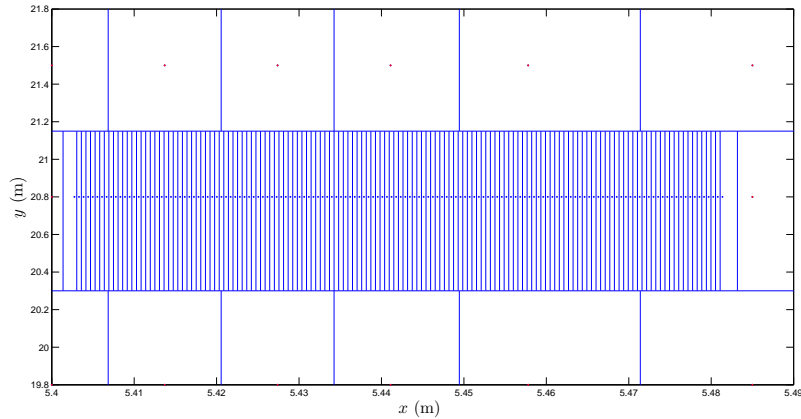


Figura 5.18: Diagrama de polígonos de Voronoï do ensaio R1, posição P1.

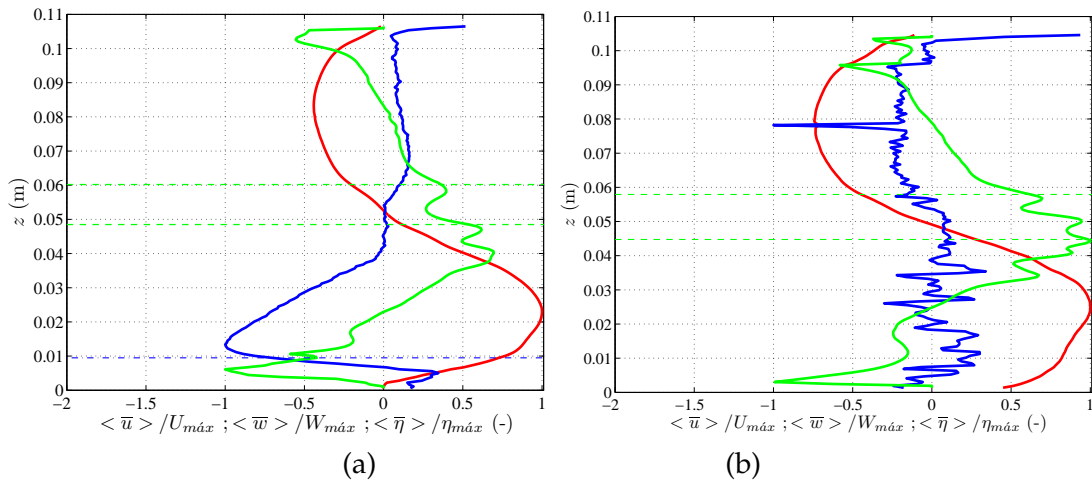


Figura 5.19: Velocidade média longitudinal (-) e vertical (-) e vorticidade média (-): a) ensaio R2, posição P1; b) ensaio S2, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

Tabela 5.1: Parâmetros de normalização, para a posição P1.

Ensaio	$U_{máx}(m/s)$	$W_{máx}(m/s)$	$\eta_{máx}(s^{-1})$
R1	0.0092	-0.00036	-0.7087
S2	0.0103	-0.00016	-0.0062

O perfil de velocidade longitudinal no ensaio R2 e S2 (Figura 5.19) exibe uma forma similar ao perfil de velocidade longitudinal de um jato de parede turbulento. Apresentam velocidades nulas na camada de mistura e na superfície rígida e gradientes de velocidade que convergem para um valor máximo.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No ensaio R2 observa-se que junto ao fundo o perfil de velocidades apresenta uma inflexão e gradiente de velocidade próximo de zero (Figura 5.19 e 5.20), o que indica que o desenvolvimento do leito (nomeadamente a dimensão e forma do material granular e os espaços de vazios) origina uma variação do gradiente de pressão e por conseguinte o gradiente de velocidade longitudinal decresce. Embora no ensaio S2 a velocidade longitudinal junto à superfície plana não seja nulo observa-se que a forma do perfil apresenta uma tendência para que a velocidade seja nula.

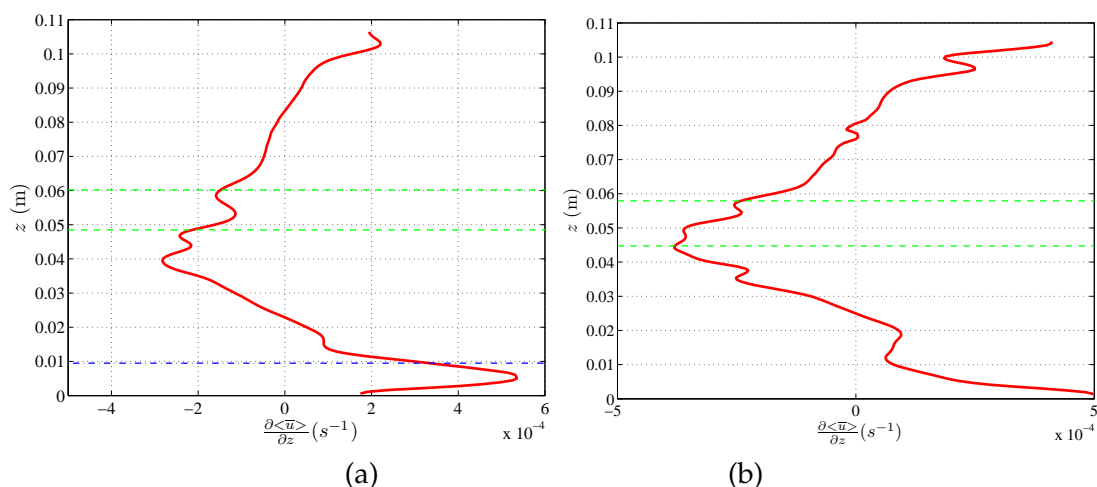


Figura 5.20: Gradiente vertical da velocidade longitudinal média: a) ensaio R2; b) ensaio S2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

Em relação à velocidade vertical é visível a influência da camada rugosa (Figura 5.19). No ensaio R2 a velocidade tem valor negativo máximo ao nível da cota mais elevada do leito, decrescendo ao longo da coluna de água e tornando-se insignificante na camada de mistura. No caso do ensaio S2 a componente não é importante.

Na Figura 5.19 é evidente que correntes de densidade apresentam uma complexa estrutura turbulenta e que a força de arrasto na interface origina turbilhões com direção e dimensão diferente dos originados pela força de arrastamento no fundo. Na região interior a estrutura apresenta vorticidade negativa, com pico máximo junto ao leito associado à condição de não-escorregamento, e decresce com a altura até anular-se ao nível da velocidade máxima. No ensaio R2 (Figura 5.19 a)) observa-se vorticidade negativa na camada rugosa que é originada pelo campo de pressão não uniforme. Na região exterior a vorticidade aumenta de magnitude ao longo da coluna de água atingindo um ponto máximo próximo da camada de mistura que está associada às forças de arrastamento desenvolvidas na interface dos fluidos. Isto mostra que ao

nível da velocidade máxima o fluxo apresenta uma rotação bastante baixa devido às diferentes grandezas escalares originadas em cada região. A partir das Figuras 5.19 e 5.20 observa-se que os picos de vorticidade localizam-se ao nível dos pontos de inflexão do gradiente de velocidade longitudinal, isto significa que a turbulência da corrente influencia o perfil de velocidade longitudinal.

Nas Figuras 5.21 e 5.22 mostra-se o perfil das tensões de Reynolds e das tensões dispersivas, respetivamente, normalizadas pela velocidade longitudinal máxima da corrente ao quadrado.

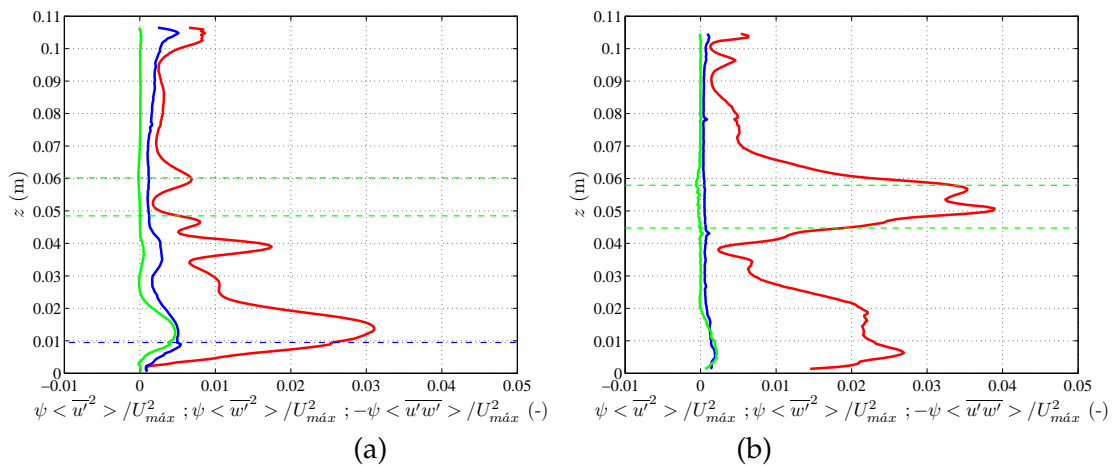


Figura 5.21: Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) de Reynolds média: a) ensaio R2, posição P1; b) ensaio S2, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

Numa primeira análise, verifica-se que a tensão normal longitudinal corresponde à tensão de Reynolds mais importante no transporte de quantidade de movimento do escoamento, e apresenta propriedades diferentes da tensão normal vertical de Reynolds. Estas diferenças mostram que a transferência de movimento turbulento no interior é anisotrópica, possivelmente causada pelas tensões de corte no leito e na camada de mistura. É notório que em ambos os ensaio as tensões normais longitudinais de Reynolds na camada de mistura associadas às instabilidades de Kelvin-Helmholtz são significativas, embora no ensaio R2 as tensões normais longitudinais de Reynolds produzidas pela força de arrastamento do fundo são superiores às da camada de mistura.

Relativamente às tensões dispersivas verifica-se que estas são importantes para a transferência de quantidade de movimento no ensaio sobre leito rugoso (Figura 5.22 a)). Novamente é visível a diferença entre as tensões normais dispersivas, sendo que a rugosidade tem maior influência na direção longitudinal. A tensão tangencial

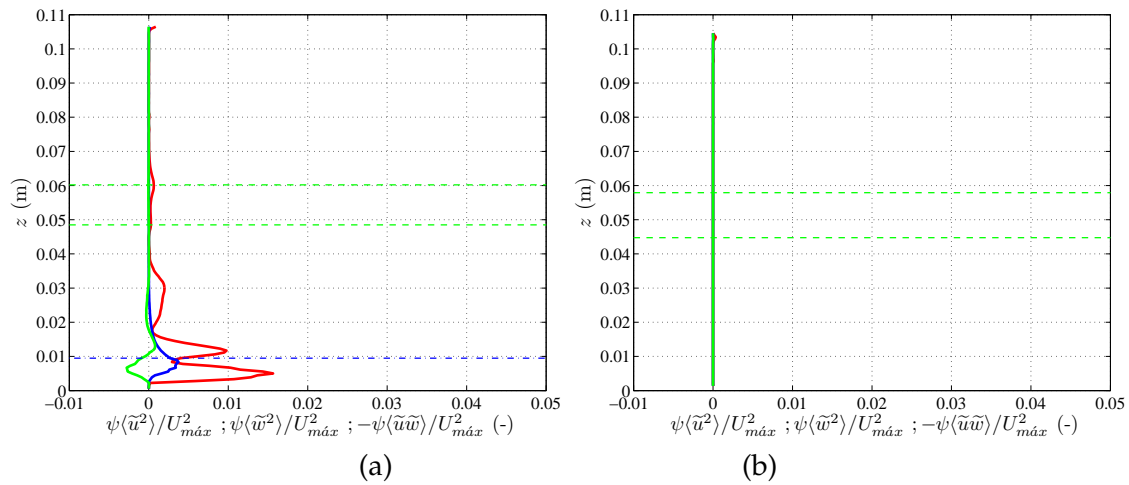


Figura 5.22: Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) média dispersivas: a) ensaio R2, posição P1; b) ensaio S2, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

dispersiva no ensaio R2 tem um valor máximo negativo no interior da camada rugosa que compensa a tensão tangencial de Reynolds. Tal como era de se esperar as tensões dispersivas tendem-se a anular com a altura.

A Figura 5.23 apresenta a energia cinética turbulenta do ensaio R2 e S2, que é determinada através da Equação (2.7). Observa-se que o perfil da ECT apresenta um desenvolvimento similar à tensão normal longitudinal de Reynolds, devido ao facto de que esta é a intensidade turbulenta dominante na estrutura interna da corrente. Logo as conclusões retiradas da análise da Figura 5.23 são semelhantes às conclusões obtidas através da análise da Figura 5.21. O objetivo da análise do perfil de ECT é verificar se os pontos de inflexão do perfil de velocidade produzem um aumento local da ECT, como foi referido por Felix (2002). A partir das Figura 5.20 e 5.23 observa-se os picos no gradiente de velocidade, que são indicadores dos pontos de inflexão, estão ao nível do aumento local da ECT.

## 5.4 Caracterização do Escoamento

Nesta seção será analisada a influência do leito e do excesso de massa volúmica sobre a estrutura turbulenta da corrente salina através da descrição cruzada dos perfis verticais das quantidades turbulentas médias no espaço e no tempo do conjunto de ensaios das posições P1 e P2.

Na Tabela 5.2 apresenta-se a velocidade média da corrente de densidade,  $U_d$ , a velocidade

#### 5.4. CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

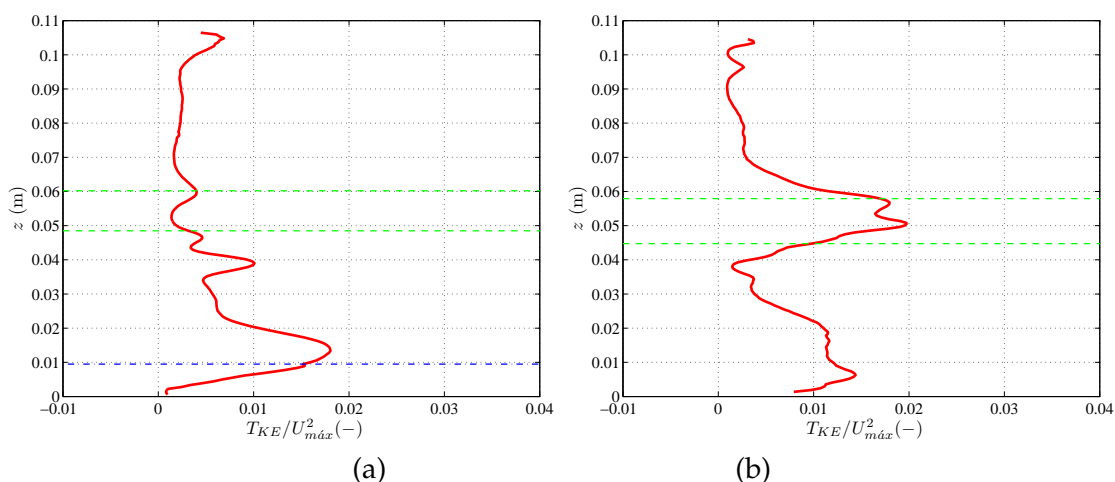


Figura 5.23: Energia cinética turbulenta, posição P1: a) ensaio R2; b) ensaio S2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano da crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

máxima da corrente de densidade,  $U_{máx}$ , a altura média da corrente de densidade,  $h_d$ , e a altura em que a velocidade da corrente é metade do valor da velocidade máxima localizada na região exterior,  $z_{1/2}$  (definidos na Tabela 2.1). Estes são os parâmetros adimensionais mais utilizados nas investigações da estrutura interna da corrente de densidade.

Relativamente aos escalares de profundidade média para quantificar as propriedades de correntes de gravidade, utilizou-se

$$U_d = \int_0^z u^2 dz / \int_0^z u dz \quad (5.13)$$

$$h_d = \int_0^z u dz / U_d \quad (5.14)$$

em que  $z$  representa a altura acima do leito onde o excesso de massa volúmica torna-se nulo. O presente estudo apenas está direcionado para as quantidades turbulentas adquiridas a partir da medição de velocidades instantâneas, neste sentido,  $z$  será definido com base no perfil de velocidade longitudinal média. Embora a camada de mistura seja uma zona de elevada turbulência, associada às instabilidades de Kelvin-Helmholtz, e por conseguinte apresente uma grande variabilidade da magnitude da velocidade e do excesso de massa volúmica, admite-se que a altura em que a velocidade longitudinal é nula representa a interface entre os dois fluidos. Isto irá evitar a necessidade da integração sobre a região de velocidade negativa causada pelo fluido ambiente.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tabela 5.2: Parâmetros adimensionais da corrente de densidade.

Zona de medição	Ensaio	$U_d$ (m/s)	$U_{máx}$ (m/s)	$h_d$ (m)	$z_{1/2}$ (m)
P1	R1	0.0054	0.0069	0.044	0.042
	R2	0.0074	0.0092	0.040	0.040
	S1	0.0071	0.0088	0.042	0.038
	S2	0.0085	0.0103	0.043	0.044
P2	R1	0.0063	0.0076	0.044	0.044
	R2	0.0083	0.0106	0.048	0.048
	S1	0.0055	0.0065	0.042	0.041
	S2	0.0094	0.0113	0.045	0.043

De uma forma geral, verifica-se que o excesso de massa volúmica e a rugosidade do leito influenciam a velocidade média e a velocidade máxima da corrente de densidade. É visível que o aumento de densidade produz um incremento da velocidade, que por sua vez diminui com o aumento da rugosidade do leito, à exceção do ensaio S1 da posição P2, que têm velocidade máxima e média menor do que o ensaio R1. Também é possível observar que de um modo geral existe um aumento da velocidade máxima e média ao longo do escoamento. Em relação à altura média não é nítido o efeito do leito e da densidade, não sendo possível chegar a uma conclusão concreta.

Da Figura 5.24 à 5.31 apresenta-se perfis verticais normalizados das variáveis hidrodinâmicas médias calculadas para caracterizar o comportamento hidrodinâmico do escoamento. Para normalizar o perfil foram utilizados as relações  $z/z_{1/2}$ ,  $\langle \bar{u} \rangle / U_{máx}$ ,  $\langle \bar{w} \rangle / U_{máx}$ ,  $\langle \overline{u_i' u_i'} \rangle / U_{máx}^2$ ,  $\langle \tilde{u}_i \tilde{u}_i \rangle / U_{máx}^2$ , que correspondem à altura, velocidade longitudinal, velocidade vertical, tensões de Reynolds e tensões dispersivas, respetivamente. Optou-se por utilizar os parâmetros  $U_{máx}$  e  $z_{1/2}$  para normalizar os perfis por serem simples de determinar e por serem utilizados em jatos de parede turbulentos.

Relativamente à velocidade longitudinal de uma corrente de densidade, o excesso de massa volúmica e o tipo de leito, para além de influenciar a magnitude da velocidade longitudinal, também influenciam a altura da velocidade máxima da corrente e as propriedades do fluido ambiente através da troca de massa e quantidade de movimento na camada de mistura.

Numa primeira análise, observa-se que os perfis verticais de velocidade longitudinal de todos os ensaios apresentam uma forma similar (Figura 5.24 e Figura 5.25 a)). Tal como explicado no subcapítulo 2.3, o perfil de velocidade longitudinal é dado em função da resistência da camada limite e da camada de mistura e do gradiente de densidade. Neste



## 5.4. CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

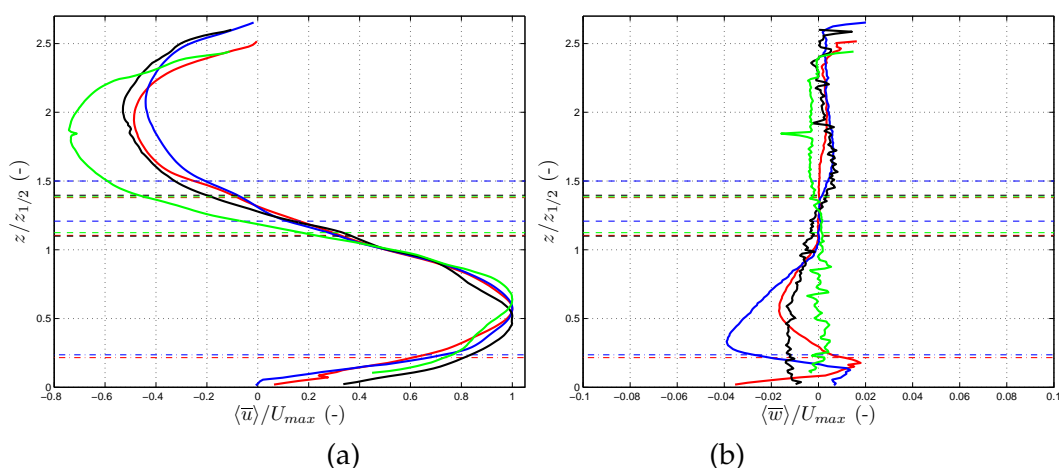


Figura 5.24: Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P1: a) velocidade longitudinal; b) velocidade vertical. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-).

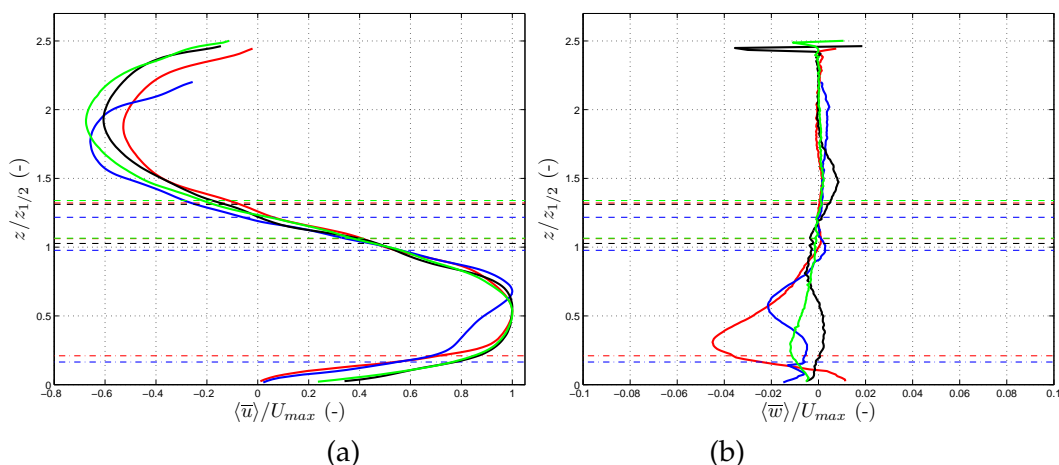


Figura 5.25: Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P2: a) velocidade longitudinal; b) velocidade vertical. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-).

sentido, uma corrente de densidade que tenha massa volúmica igual mas que difere no tipo de leito, a velocidade longitudinal será influenciada principalmente pela força de arrastamento desenvolvida no leito. Comparando os ensaios R1 e S1 ou R2 e S2 de cada uma das posições, verifica-se que o aumento da camada rugosa induz uma redução da velocidade longitudinal provocada pelas tensões de corte. No caso em que o tipo de leito é similar e o excesso de densidade diferente, a função da resistência na camada de mistura e o gradiente de densidade apresentam propriedades diferentes. Quando o excesso de densidade é maior o gradiente de densidade e a força de arrastamento na interface aumentam, o que irá originar um aumento da velocidade longitudinal.

A altura da velocidade máxima é outra propriedade da corrente de densidade que é influenciada pelo arrastamento na camada limite e na camada de mistura e pelo

## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

gradiente de excesso de densidade. Na Tabela 5.3 apresenta-se a altura normalizada da velocidade máxima para os ensaios nas posições P1 e P2. Nos casos em que as condições de contorno do fundo são semelhantes (R1 e R2 e/ou S1 e S2) o incremento do excesso de densidade irá gerar um aumento da intensidade turbulenta na camada de mistura e por conseguinte a altura da velocidade máxima afasta-se do fundo. Em relação aos ensaios da posição P1, verifica-se que nas correntes de densidade sobre leito liso a altura da velocidade máxima aumenta com o aumento da massa volúmica, o que satisfaz o conceito teórico referido anteriormente. No caso das correntes de densidade sobre leito rugoso observa-se que ambos têm a mesma altura da velocidade máxima. Isto poderá estar relacionado com o intervalo entre o início da passagem da cabeça na zona de medição e o instante em que inicia-se a medição das velocidades no corpo da corrente, ou seja, no R1 o tempo de espera foi menor o que poderá indicar que a medição ainda foi realizada na cabeça da corrente que tem uma elevada taxa de mistura na interface. No caso dos ensaios da posição P2, os resultados não estão de acordo com os da posição P1, verifica-se que nos ensaios de leito rugoso o aumento da massa volúmica induz um incremento da altura máxima, mas nos ensaios sobre leito liso o aumento de massa volúmica induz uma redução da altura máxima.

Em relação aos ensaios que tem excesso de densidade igual mas condições de contorno no fundo diferentes (R1 e S1 e/ou R2 e S2) o aumento da rugosidade origina um incremento das tensões de corte que irão aproximar a altura de velocidade máxima do leito. Nos ensaios R2 e S2 da posição P1 e os ensaios R1 e S1 da posição P2 essa aproximação é visível, no entanto a comparação com o ensaio R1 e S1 da posição P1 e o ensaio R2 e S2 da posição P2 os resultados não são os esperados.

Tabela 5.3: Altura em que ocorre a velocidade máxima.

Posição	P1				P2			
Ensaio	R1	R2	S1	S2	R1	R2	S1	S2
$h_{m\acute{a}x}/z_{1/2}(-)$	0.57	0.57	0.52	0.64	0.53	0.68	0.57	0.53

O fluxo de retorno surge dos efeitos da difusão viscosa e do arrastamento turbulento ao longo da interface, logo a intensidade turbulenta na camada de mistura tem influência sobre a magnitude da velocidade longitudinal do fluxo de retorno. Com base nas Figuras 5.24 a) e 5.25 a) é visível que a velocidade longitudinal do fluxo de retorno aumenta com o aumento da da massa volúmica da corrente de densidade, isto é, o aumento do excesso de massa volúmica induz um incremento da troca de massa e quantidade de movimento na interface (camada de mistura mais intensa). E diminui com o aumento da rugosidade do leito, devido ao efeito de diminuição da velocidade longitudinal da corrente que a

## 5.4. CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

camada rugosa induz.

As Figuras 5.24 b) e 5.25 b) evidenciam a influência do leito sobre a velocidade vertical. A existência da camada rugosa origina pico de velocidade vertical perto do leito que dependem do desenvolvimento do leito e da massa volúmica da corrente de densidade, na camada de mistura estas são insignificantes. No ensaio do leito liso as velocidades verticais apresentam valor próximo de zero, sendo desprezáveis em comparação com a velocidade longitudinal.

As tensões de Reynolds e as tensões dispersivas são indicadores de intensidade de turbulência, sendo que os primeiros traduzem o efeito da flutuação da velocidade sobre a troca de massa e quantidade de movimento e a segundo o efeito do leito sobre a transferência de massa e quantidade de movimento.

Da Figuras 5.26 à 5.31 observa-se que as tensões normais longitudinais de Reynolds são as que mais contribuem para a transferência de quantidade de movimento, e as tensões normais longitudinais dispersivas são similares.

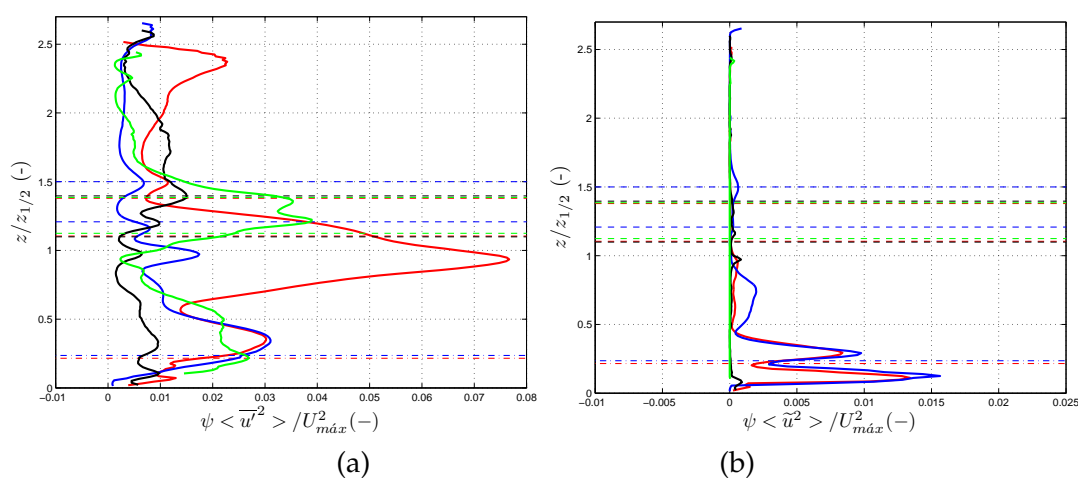


Figura 5.26: Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P1: a) tensão normal longitudinal de Reynolds; b) tensão normal longitudinal dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura.

Relativamente aos ensaios da posição P1, analisando os ensaios R1 e R2, observa-se que existe uma similaridade ao longo da coluna de água das tensões normais longitudinais de Reynolds (Figura 5.26 a)). No caso do ensaio R1 estas apresentam valor máximo próximo da camada de mistura, que estão associadas às instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Junto ao leito ambos apresentam valor positivo, que no caso do ensaio R2 é o valor máximo. Esta diferença de magnitude nas tensões junto à camada de mistura justifica

CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

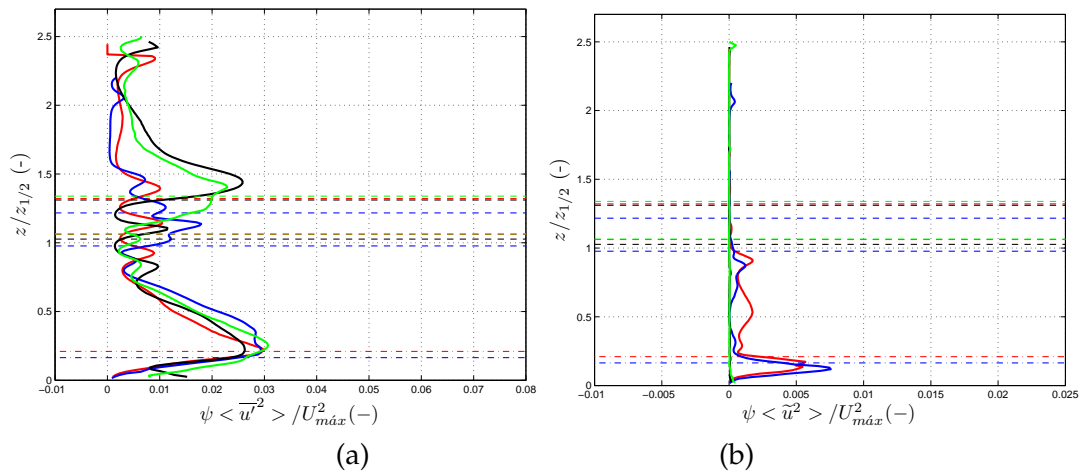


Figura 5.27: Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P2: a) tensão normal longitudinal de Reynolds; b) tensão normal longitudinal dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura.

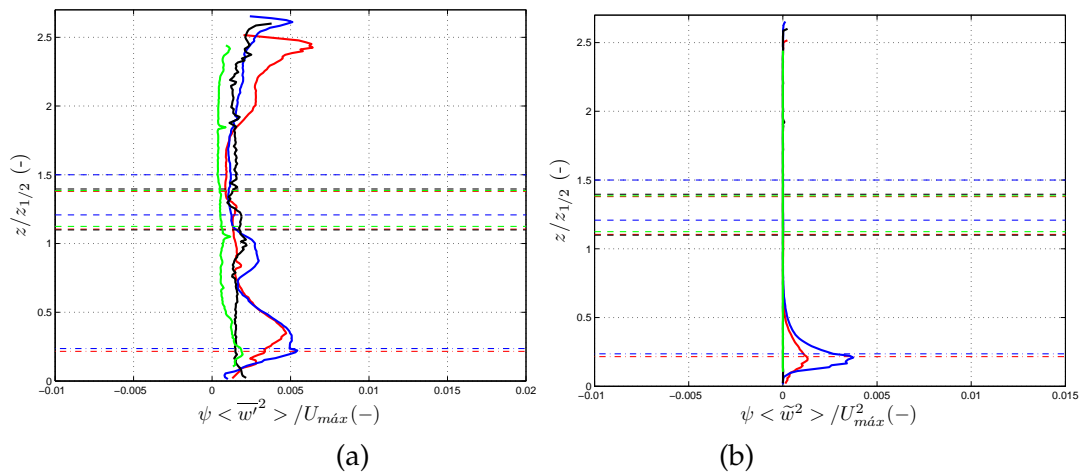


Figura 5.28: Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P1: a) tensão normal vertical de Reynolds; b) tensão normal vertical dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura.

o valor da altura da velocidade máxima, porque é um dos indicados que existe uma força de arrastamento na interface que contraria a produção de turbulência no fundo. Relativamente aos ensaios S1 e S2 verifica-se que as tensões normais longitudinais de Reynolds no ensaio S2 são superiores ao do ensaio S1 tanto na camada de mistura como no fundo, sendo que o valor máximo em ambos é na camada de mistura. Esta diferença de intensidade entre ensaios justifica a altura da velocidade máxima.

No caso dos ensaios da posição P2, verifica-se que os ensaios R1 e R2 apresentam valor

#### 5.4. CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

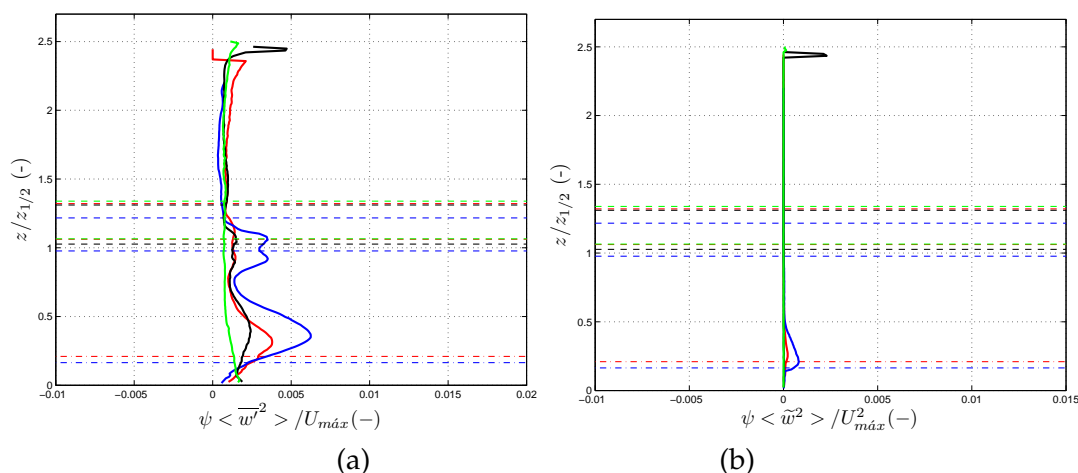


Figura 5.29: Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P2: a) tensão normal vertical de Reynolds; b) tensão normal vertical dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura.

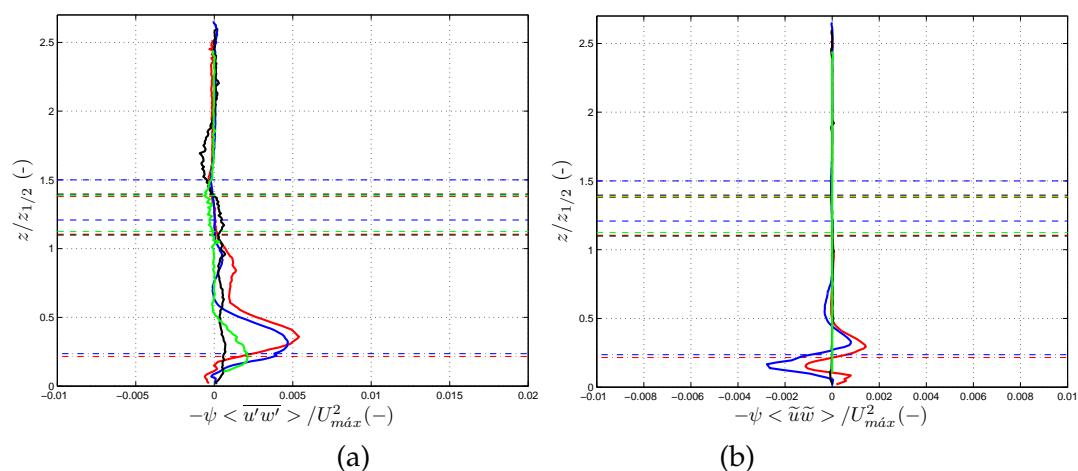


Figura 5.30: Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P1: a) tensão tangencial de Reynolds; b) tensão tangencial dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura.

máximo próximo do leito, que aumenta com o aumento da massa volúmica (Figura 5.27 a)). Em relação aos ensaios S1 e S2, verifica-se que ambos apresentam maior magnitude próxima do leito e que esta aumenta com o aumento da massa volúmica da corrente de densidade. No caso do ensaio S1 as tensões normais longitudinais de Reynolds na camada de mistura e junto ao leito têm magnitude muito próxima.

Relativamente às tensões normais longitudinais dispersivas observa-se que são significativas apenas nos ensaios R1 e R2. Apresentam um desenvolvimento similar em

## CAPÍTULO 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

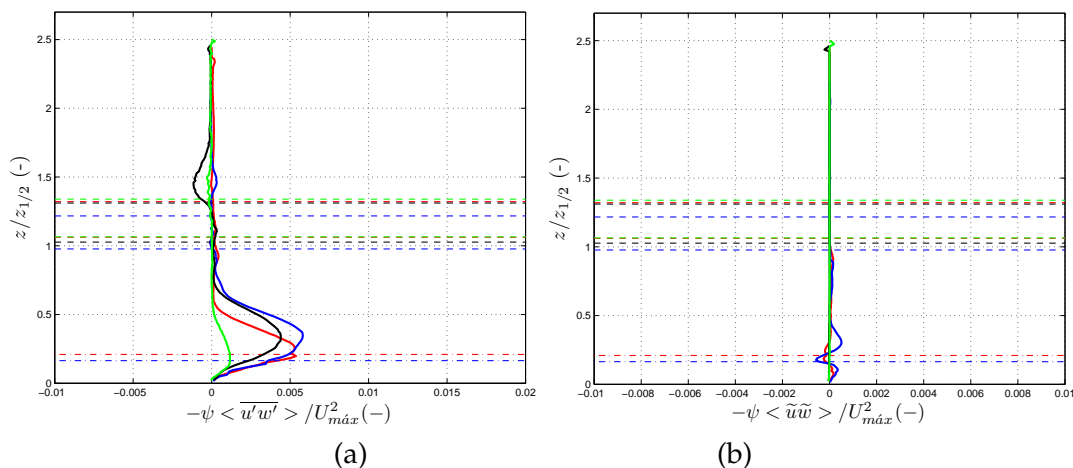


Figura 5.31: Comparação entre perfis verticais dos ensaios da posição P2: a) tensão tangencial de Reynolds; b) tensão tangencial dispersiva. Ensaio R1 (-), R2 (-), S1 (-) e S2 (-). A linha traço-ponto corresponde à camada rugosa e a linha traço-traço identifica a zona da camada de mistura.

ambos os ensaios, sendo que o aumento de densidade induz um aumento das tensões. Ao longo da coluna de água estes tendem para zero (Figuras 5.26 b) e 5.27 b)).

Nas Figuras 5.28 e 5.29 verifica-se que nos ensaios S1 e S2 as tensões normais verticais de Reynolds apresentam valor próximo de zero ao longo da coluna de água, e nos ensaios R1 e R2 observa-se dos picos próximos do leito originados pelas tensões de corte no fundo que aumentam com o aumento da densidade da corrente. As tensões normais verticais dispersivas são desprezáveis nos ensaios de leito liso, e no caso do leito rugoso os elementos irregulares tem influência na direção vertical produzindo troca de quantidade de movimento junto ao leito, esta intensifica-se com o aumento da densidade. Novamente é visível a diferença entre as propriedades das tensões normais de Reynolds, o que indica que a corrente é anisotrópica.

Relativamente às tensões tangenciais de Reynolds, observa-se que na camada de misturas são insignificantes em todos os ensaios, e que nos ensaios R1 e R2 existe dois picos máximos originados pela irregularidade do leito, tanto na posição P1 como na posição P2. Também é visível a condição de não escorregamento nos ensaios de leito liso na existência de tensão tangencial de Reynolds próximo do leito que aumento com o aumento da densidade (Figura 5.30 a) e 5.31 a)), sendo que no caso do ensaio S1 da posição P2 as tensões tangenciais de Reynolds têm magnitude muito próxima dos ensaios de leito rugoso. As tensões tangenciais dispersivas não são importantes nos ensaios do leito liso, mas no caso do leito rugoso observa-se valor negativo na zona da camada rugosa e valor positivo próximo da cota mais elevada do leito.

## Capítulo 6

# Conclusão e desenvolvimentos futuros

No presente trabalho estudou-se a estrutura turbulenta de correntes de densidade conservativas *quasi*-permanentes, em particular, a influência do leito e da diferença de densidade entre a corrente de densidade e o meio ambiente sobre a estrutura interna da corrente de densidade. Neste sentido, foram realizados ensaios experimentais que consistiam na medição de velocidades instantâneas no corpo da corrente de densidade, com recurso ao equipamento PIV. A corrente de densidade era originada pela intrusão de uma mistura salina ( $\rho = 1010 \text{ kg/m}^3$  e  $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$ ) num fluido ambiente ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) em repouso.

Com base nas velocidades instantâneas medidas estimou-se a espessura da camada de mistura e analisou-se o escoamento médio temporal através dos mapas e perfis verticais da velocidade, vorticidade e tensão de Reynolds média no tempo. De uma forma geral, a camada de mistura dos ensaios realizados apresenta uma espessura que varia entre 7% a 13% da altura total do escoamento. Observou-se que o aumento do excesso de massa volúmica induz um incremento da espessura da camada de mistura, associado ao aumento das instabilidades de Kelvin-Helmholtz geradas na cabeça da corrente. Com base nos ensaios similares em cada posição, verificou-se que existe uma redução de espessura da camada de mistura da posição P1 para a P2, que poderá indicar que a turbulência na camada de mistura amortece.

Da análise dos mapas e perfis das variáveis hidrodinâmicas médias no tempo (velocidade longitudinal e vertical, vorticidade e tensão de Reynolds) é visível o efeito da camada rugosa na distribuição espacial das variáveis hidrodinâmicas no escoamento, o que mostra que a aplicação da metodologia da dupla média (DAM) é o procedimento mais adequado para estudar o efeito do leito sobre o escoamento. Do mapa de velocidade longitudinal média temporal observou-se que a corrente salina estudada é uma corrente

## *CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS*

de densidade de fundo, e que o fluido ambiente apresenta uma velocidade no sentido oposto ao do escoamento. Relativamente à influência do excesso de massa volúmica e do leito sobre a estrutura interna da corrente, verificou-se que o aumento da massa volúmica da corrente salina incrementa a magnitude da velocidade longitudinal que, por sua vez devido ao aumento do arrastamento na interface e da difusão viscosa origina uma velocidade longitudinal negativa no fluido ambiente. Esta diferença de velocidade longitudinal entre os dois fluidos origina perturbações na camada de mistura que podem ser identificadas no mapa de vorticidade (vorticidade positiva na interface). Em relação à influência do leito, observou-se que o aumento da rugosidade reduz a magnitude da velocidade longitudinal da corrente de densidade, e tem influência na velocidade vertical junto ao leito. Também observou-se que o aumento da rugosidade origina um aumento das tensões tangenciais de Reynolds junto ao leito.

No estudo dos perfis verticais normalizados dos ensaios R2 e S2 na posição P1, obtidos após a aplicação da metodologia da dupla média, observou-se no ensaio R2 o perfil de velocidade longitudinal apresenta uma inflexão e gradiente de velocidade nulo junto ao leito, o que mostra que a rugosidade origina uma variação do gradiente de pressão na camada limite. Comparando o perfil de vorticidade média e gradiente de velocidade verificou-se que picos de vorticidade estão ao nível dos pontos de inflexão do gradiente de velocidade longitudinal, logo a turbulência influencia o perfil da velocidade longitudinal. Esta influência é novamente notória comparando o perfil de energia cinética turbulenta (ECT) e o perfil do gradiente de velocidade longitudinal, em que ao nível dos pontos de inflexão no perfil de velocidade longitudinal existe um aumento local da ECT. Em relação às tensões de Reynolds observou-se que a componente normal longitudinal é a responsável pela transferência de massa e quantidade de movimento, sendo que no caso do leito liso a tensão normal longitudinal de Reynolds é maior na camada de mistura, e no caso do leito rugoso é maior perto do leito. Tensões tangenciais de Reynolds ocorrem perto do leito e são mais importantes no caso do leito rugoso. As tensões dispersivas são importantes para a transferência de quantidade de movimento no ensaio do leito rugoso e tendem a anular-se com a altura.

No sentido de estudar a influência das condições de contorno (leito e diferença de densidade entre os fluidos) na estrutura interna da corrente de densidade, realizou-se uma análise cruzada dos perfis verticais normalizados das quantidades turbulentas médias no tempo e no espaço. Relativamente à cinemática do escoamento, observou-se que as velocidades verticais são apenas relevantes nos ensaios de leito rugoso (R1 e R2), e que aumentam com o aumento da massa volúmica da corrente de densidade. Do perfil das velocidades longitudinais verificou-se que o leito e o excesso de massa volúmica são condições que afectam a forma do perfil (em particular, a magnitude da velocidade máxima e da altura da velocidade máxima). Nos casos em que as



condições de contorno do limite inferior são similares (R1 e R2 ou S1 e S2), o perfil de velocidades longitudinais é ajustado em função da força de arrastamento imposta no limite superior, neste sentido, verificou-se que o aumento da massa volúmica intensifica a turbulência na camada de mistura devido ao aumento da velocidade da corrente de densidade, e por conseguinte aumenta a força de arrastamento na interface que induz um incremento da altura da velocidade máxima da corrente de densidade. Nos ensaios em que as condições do limite superior são semelhantes (R1 e S1 ou R2 e S2), o perfil é afectado pela força de arrastamento originada na camada limite. Observou-se que em situações em que o leito é composto por elementos rugosos a magnitude da velocidade longitudinal máxima da corrente salina e a altura da velocidade máxima diminuem, devido ao incremento das tensões de corte da camada limite (Tabela 5.2 e 5.3).

Relativamente às tensões de Reynolds, observou-se que as tensões normais de Reynolds (longitudinais e verticais) apresentam propriedades diferentes, o que mostra que a transferência de movimento turbulento no interior da corrente salina é anisotrópica. Do perfil vertical das tensões normais longitudinais de Reynolds, verificou-se que estas têm picos máximos junto ao leito e na camada de mistura, e que dependem das condições a que a corrente salina está sujeita. Foi visível que o aumento rugosidade intensifica as tensões desenvolvidas junto ao leito, e que o aumento do excesso de massa volúmica aumenta a magnitude das tensões desenvolvidas na camada de mistura. As tensões tangenciais de Reynolds são importantes no caso do leito rugoso, devido ao aumento das tensões de corte junto ao leito. Em relação às tensões dispersivas, observou-se que comparativamente com as tensões de Reynolds são desprezáveis nos ensaios do leito liso, em contrapartida, nos ensaios do leito rugoso estas são significativas junto ao leito. O aumento da massa volúmica da corrente salina origina um incremento das tensões dispersivas, e verificou-se que a rugosidade tem maior influência nas tensões normais longitudinais dispersivas.

Com o desenvolvimento do trabalho experimental concluiu-se que existe aspectos que devem ser investigados de modo a melhorar a compreensão da estrutura turbulenta, nomeadamente se apenas interação entre corrente de densidade e o leito, e entre a corrente de densidade e o fluido ambiente têm influência sobre a estrutura interna, ou se os elementos constituintes da corrente de densidade (por exemplo, partículas em suspensão) tem um papel importante na turbulência. Deste modo sugere-se a realização dos seguintes trabalhos futuros:

- continuação do estudo experimental de correntes de densidade conservativas *quasi*-permanentes diferentes massas volúmicas e sujeita a diferentes dimensões dos elementos rugosos no leito, e diferentes inclinações do fundo;
- elaboração de um estudo experimental com condições semelhantes ao presente

## CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

estudo, sendo que este consistia na estimativa da densidade do campo instantâneo através da técnica de análise de imagem utilizada por Nogueira et al. (2013b). Este estudo irá permitir a quantificação da estabilidade da estratificação do escoamento, e por conseguinte qualificar o estado da mistura turbulenta na corrente de densidade;

- realização de um estudo experimental baseado na medição das velocidades instantâneas com recurso ao equipamento PIV, na região da cabeça da corrente de densidade, de modo a investigar a influência da cabeça sobre o corpo da corrente de densidade sujeita a condições de contorno semelhantes ao presente trabalho;
- investigação da influência de partículas em suspensão sobre a estrutura interna de uma corrente de densidade não-conservativa *quasi*-permanente.

# Bibliografia

- Althaus, J. M. I. J., de Cesare, G., e Schleiss, A. J. (2008). Release of sediment laden water through power intakes of deep reservoirs. Em *Proc. River Flow 2008*, páginas 1173–1180, Cesme-Izmir, Turkey.
- Alves, E., González, J., Freire, P., e Cardoso, H. (2008). Experimental study of plunging turbidity currents in reservoirs. Em *Proc. River Flow 2008*, páginas 1157 – 1164, Cesme-Izmir, Turkey.
- Alves, E. C. T. L. (2008). *Sedimentação em albufeiras por correntes de turbidez*. Tese de Doutoramento, Universidade técnica de Lisboa, Instituto superior técnico.
- An, S., Julien, P. Y., e Venayagamoorthy, S. K. (2012). Numerical simulation of particle-driven gravity currents. *Environmental Fluid Mechanics*, 12(6):495–513.
- Ancey, C. (2012). Gravity flow on steep slope. Em *Bouyancy-Driven Flows*, páginas 372–431. Cambridge.
- Buckee, C., Kneller, B., e Peakall, J. (2001). Turbulence structure in steady, solute-driven gravity currents. *Spec. Publs. int. Ass. Sediment.*, 31:173–187.
- Coleman, S. E., Nikora, V. I., e Schlicke, T. (2008). Spatially-averaged oscillatory flow over a rough bed. *Acta Geophysica*, 56(3):698–733.
- Dallimore, C. J., Imberger, J., e Ishikawa, T. (2001). Entrainment and turbulence in saline underflow in Lake Ogawara. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11):937–948.
- Felix, M. (2002). Flow structure of turbidity currents. *Sedimentology*, 49:397–419.
- Ferreira, R. M. L., Ricardo, A. M. C., Ferreira, L. S. M., Leal, J. G. A. B., e Franca, M. J. (2010). Hidrodinâmica de escoamentos com superfície livre e fronteiras rugosas. Em *10th Congresso de Água - Marcos d'Água*, Algarve, Portugal.
- Franca, M. J., Ferreira, R. M. L., e Lemmin, U. (2008). Parameterization of the logarithmic layer of double-averaged streamwise velocity profiles in gravel-bed river flows. *Advances in Water Resources*, 31:915–925.

## BIBLIOGRAFIA

- Gerber, G. (2008). *Experimental measurement and numerical modelling of velocity, density and turbulence profiles of gravity current*. Tese de Doutorado, University of Stellenbosch.
- Gerber, G., Diedericks, G., e Basson, G. R. (2011). Particle image velocimetry measurements and numerical modeling of a saline density current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(3):333–342.
- Goring, D. G. e Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1):117–126.
- Gray, T. E., Alexander, J., e Leeder, M. R. (2005). Quantifying velocity and turbulence structure in depositing sustained turbidity currents across breaks in slope. *Sedimentology*, 52:467–488.
- Instruments, N. (2011). O que é a tecnologia DAQ? Relatório, National Instruments corporation. (disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/8734/pt>).
- Keyence (s/d). Technical guide. Relatório, Keyence corporation. (disponível em: [http://www.keyence.com/dwn/displacement\\_tg\\_ka.pdf](http://www.keyence.com/dwn/displacement_tg_ka.pdf)).
- Kneller, B., Bennett, S. J., e McCaffrey, W. D. (1999). Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. *Journal of Geophysical Research*, 104:5381–5391.
- Kneller, B. e Buckee, C. (2000). The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. *Sedimentology*, 47:62–94.
- Meiburg, E. e Kneller, B. (2010). Turbidity currents and their deposits. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42:135–156.
- Melling, A. (1997). Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 8(12):1406–1416.
- Mok, K. M., Jeong, K. K., e Yeh, H. (2003). Experimental observations of the flow structures at gravity current fronts. Em *International conference on estuaries and coasts*. (disponível em: <http://www.irtces.org/pdf-hekou/124.pdf>).
- Moodie, T. B. (2002). Gravity currents. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 144:49–83.
- Nikora, V., Ballio, F., Coleman, S., e Pokrajac, D. (2013). Spatially averaged flows over mobile rough beds: definitions, averaging theorems, and conservation equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(8):803–811.
- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., e Griffiths, G. (2001). Spatially averaged open-channel flow over rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2):123–133.

- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., e Walters, R. (2007). Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: theoretical background. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8):873–883.
- Nogueira, H. I. S., Adduce, C., Alves, E., e Franca, M. J. (2012). Visualization and characterization of gravity currents over rough beds by means of PIV measurements. Em Proc. 2nd IAHR Europe Congress, *Munich, Germany, 27-29 June*.
- Nogueira, H. I. S., Adduce, C., Alves, E., e Franca, M. J. (2013a). Dynamics of the head of gravity currents. *Environmental Fluid Mechanics Advance online publication*. doi:10.1007/s10652-013-9315-2.
- Nogueira, H. I. S., Adduce, C., Alves, E., e Franca, M. J. (2013b). Image analysis technique applied to lock-exchange gravity currents. *Measurement Science and Technology*, 24(047001):4pp.
- Pawlak, G. e Armi, L. (2000). Mixing and entrainment in developing stratified currents. *Journal Fluid Mechanics*, 424:45–73.
- Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., e Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry. A Practical Guide*. Springer, Germany, 2nd edição.
- Ricardo, A. M. C. (2008). Caracterização do escoamento turbulento em canais com vegetação emersa rígida. aplicação ao estudo da resistência hidráulica. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- Rossato, R. e Alves, E. (2011). Experimental study of turbidity currents flow around obstacles. Em Proc. 7th Int. Symp. on Stratified Flows, Rome, Italy.
- Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R. T., Sun, T., García, M. H., e Parker, G. (2010). Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing over a mobile bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(7):412–433.
- Simão, J. G., Ricardo, A. M., e Ferreira, R. M. L. (2009). Análise de sensibilidade a medições PIV para a caracterização de escoamentos hidraulicamente rugosos com moderada submersão relativa. Em *III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia*, Bragança, Portugal.
- Simpson, J. E. (1997). *Gravity currents in the environment and the laboratory*. Cambridge University Press., 2nd edição.
- Simpson, J. E. e Britter, R. E. (1979). The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. *Journal Fluid Mechanics*, 94:477–495.

## BIBLIOGRAFIA

- Sousa, A. L. (2011). Trocas de massa no interior de uma corrente de densidade. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Wereley, S. T. e Meinhart, C. D. (2000). Accuracy improvements in particle image velocimetry algorithms. Em *10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.*, Fundação Gulbenkian/Centro de Estudos em Inovação, Tecnologia e Políticas de Desenvolvimento (IST). (disponível em: [http://in3.dem.ist.utl.pt/downloads/lxlaser2000/pdf/13\\_4.pdf](http://in3.dem.ist.utl.pt/downloads/lxlaser2000/pdf/13_4.pdf)).
- Westerweel, J. (1994). Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data. *Experiments in Fluids*, 16:236–247.
- Westerweel, J. (1997). Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 8:1379–1392.
- Zhang, T., Celik, D., e Sciver, S. W. V. (2004). Tracer particles for application to PIV studies of liquid helium. *Journal of Low Temperature Physics*, 134(3):985–1000.

## Apêndice A

# Equações hidrodinâmicas

O presente anexo tem como objetivo apresentar os procedimentos utilizados para obtenção das equações hidrodinâmicas do escoamento.

### A.1 Equação de conservação massa

Aplicando os teoremas (2.11) e (2.12) às equações hidrodinâmicas (2.8a) e (2.8b) temos,

$$\frac{\partial(1-c)[\rho^{(w)}]}{\partial t} + \frac{\partial(1-c)[\rho^{(w)}u_i^{(w)}]}{\partial x_i} - \underbrace{\frac{(1-c)}{V_f} \int_{S_{int}} \rho^{(w)}u_i^{(w)}n_j dS}_{\text{Termo A}} = 0, \quad (\text{A.1a})$$

$$\frac{\partial c[\rho^{(s)}]}{\partial t} + \frac{\partial c[\rho^{(s)}u_i^{(s)}]}{\partial x_i} - \underbrace{\frac{c}{V_f} \int_{S_{int}} \rho^{(s)}u_i^{(s)}n_j dS}_{\text{Termo B}} = 0, \quad (\text{A.1b})$$

Os termos A e B das equação (A.1a) e (A.1b) respetivamente surgem da interação entre os elementos da mistura. Como o sal está dissolvido apenas existirá interações moleculares que não serão contabilizadas, logo os termos são nulos.

Para a combinação das equações é necessário ter atenção quais as variáveis que devemos somar, ou seja, como estamos a trabalhar num volume a velocidade do escoamento é igual à velocidade da água e à velocidade do sal sendo uma componente global, logo

$$\underbrace{\frac{\partial(1-c)[\rho^{(w)}]}{\partial t}}_{A(w)} + \underbrace{\frac{\partial c[\rho^{(s)}]}{\partial t}}_{A(s)} + \frac{\partial(1-c)[\rho^{(w)}u_i]}{\partial x_i} + \frac{\partial c[\rho^{(s)}u_i]}{\partial x_i} = 0, \quad (\text{A.2})$$

Como exemplo demonstrativo temos a soma dos termos  $A(w)$  e  $A(s)$ ,

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial [\rho^{(w)}]}{\partial t} (1 - c) - \frac{\partial c}{\partial t} [\rho^{(w)}] + \frac{\partial c}{\partial t} [\rho^{(s)}] + \frac{\partial [\rho^{(s)}]}{\partial t} c = \\
 & \frac{\partial c}{\partial t} ([\rho^{(s)}] - [\rho^{(w)}]) + \frac{\partial}{\partial t} ([\rho^{(w)}] - [\rho^{(w)}] c + [\rho^{(s)}] c) = \\
 & \frac{\partial c}{\partial t} (s - 1) + \frac{\partial}{\partial t} (1 - c + sc) = \frac{\partial \rho^m}{\partial t}, \tag{A.3}
 \end{aligned}$$

onde  $\rho^m = (1 + c(s - 1))$  é a massa volúmica média e  $s$  é a densidade do sal.

Com base no procedimento aplicado na equação (A.3), a equação de conservação de massa para o escoamento é dada por,

$$\frac{\partial \rho^m}{\partial t} + \frac{\partial \rho^m u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{A.4}$$

Sendo as correntes de densidade escoamentos que tem como principal fonte de movimentação forças de flutuação associadas a pequenas variações de densidade, para a aplicação admite-se que é um fluido incompressível (An et al., 2012). Ou seja, admite-se que o fluido não homogéneo, tal como o homogéneo, permanece não homogéneo ao longo do tempo, isto é, para um fluido incompressível não homogéneo existe variações de densidade local ( $\partial \rho / \partial t \neq 0$ ) e espacial ( $\partial \rho / \partial x_i \neq 0$ ) embora  $D\rho / Dt = 0$ . Logo,

$$\frac{\partial \rho^m}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho^m}{\partial x_i} + \rho^m \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \Leftrightarrow \rho^m \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{A.5}$$

## A.2 Equação de conservação quantidade de movimento

Para um fluido Newtoniano incompressível a força de contacto da equação (2.9b) é dada por,

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu^{(w)} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i}, \tag{A.6}$$

onde  $p$  é a pressão local e  $\mu^{(w)}$  é a viscosidade dinâmica de água (Ricardo, 2008, p. 7).

Logo a equação (2.9b) escreve-se,



## A.2. EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO QUANTIDADE DE MOVIMENTO

$$\frac{\partial u_j^{(s)} \rho^{(s)}}{\partial t} + u_i^{(s)} \frac{\partial u_j^{(s)} \rho^{(s)}}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu^{(w)} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + (\rho^{(s)} - \rho^{(w)}) g_j, \quad (\text{A.7})$$

Aplicando os teoremas (2.11) e (2.12) às equações (2.9a) (A.2), a equação de conservação de quantidade de movimento é dada por,

$$\begin{aligned} \frac{\partial(1-c) [\rho^{(w)} u_j^{(w)}]}{\partial t} + [u_i^{(w)}] \frac{\partial(1-c) [\rho^{(w)} u_j^{(w)}]}{\partial x_i} &= -\frac{\partial(1-c) [p]}{\partial x_j} + \underbrace{\frac{(1-c)}{V_f} \int_{S_{int}} p n_j dS}_{\text{Termo 1A}} \\ + \mu^{(w)} \frac{\partial^2(1-c) [u_j^{(w)}]}{\partial x_i \partial x_i} + (\rho^{(s)} - \underbrace{\frac{(1-c)}{V_f} \int_{S_{int}} \mu^{(w)} \frac{\partial u_j^{(w)}}{\partial x_i} n_i dS}_{\text{Termo 1B}}) &+ (1-c) [\rho^{(w)}] g_j, \end{aligned} \quad (\text{A.8a})$$

$$\frac{\partial c [\rho^{(s)} u_j^{(s)}]}{\partial t} + [u_i^{(s)}] \frac{\partial c [\rho^{(s)} u_j^{(s)}]}{\partial x_i} = c \left( [\rho^{(s)}] - [\rho^{(w)}] \right) g_j, \quad (\text{A.8b})$$

Tal como os termos A e B das equação (A.1a) e (A.1b), os termos 1A e 1B são nulos.

A combinação das equações procede-se de forma semelhante ao procedimento utilizado nas equações de conservação de massa, sendo dada por,

$$\begin{aligned} \frac{\partial(1-c) [\rho^{(w)} u_j]}{\partial t} + \frac{\partial c [\rho^{(s)} u_j]}{\partial t} + [u_i] \frac{\partial(1-c) [\rho^{(w)} u_j]}{\partial x_i} + [u_i] \frac{\partial c [\rho^{(s)} u_j]}{\partial x_i} &= -\frac{\partial(1-c) [p]}{\partial x_j} \\ + (1-c) \mu^{(w)} \frac{\partial^2 [u_j]}{\partial x_i \partial x_i} + (1-c) [\rho^{(w)}] g_j + c \left( [\rho^{(s)}] - [\rho^{(w)}] \right) g_j &\Leftrightarrow \\ \frac{\partial(1-c) [u_j]}{\partial t} + \frac{\partial c s [u_j]}{\partial t} + [u_i] \frac{\partial(1-c) [u_j]}{\partial x_i} + [u_i] \frac{\partial c s [u_j]}{\partial x_i} &= -\frac{1}{[\rho^{(w)}]} \frac{\partial(1-c) [p]}{\partial x_j} \\ + (1-c) \nu^{(w)} \frac{\partial^2 [u_j]}{\partial x_i \partial x_i} + ((1-c) + c(s-)) g_j, & \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Logo a equação de conservação de quantidade de movimento que descreve o escoamento é dado por,

## APÉNDICE A

$$\frac{\partial u_j \rho^m}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j \rho^m}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho^{(w)}} \frac{\partial(1-c)p}{\partial x_j} + (1-c)\nu^{(w)} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + (\rho^m - c\rho^w)g_j, \quad (\text{A.10a})$$

## Apêndice B

# Escoamento médio espacial-temporal

No presente anexo serão apresentados perfis verticais das quantidades turbulentas médias (no tempo e no espaço) dos ensaios R1 e S1 na posição P1 e do conjunto de ensaios relativos à posição P2.

### B.1 Conjunto de ensaios da posição P1

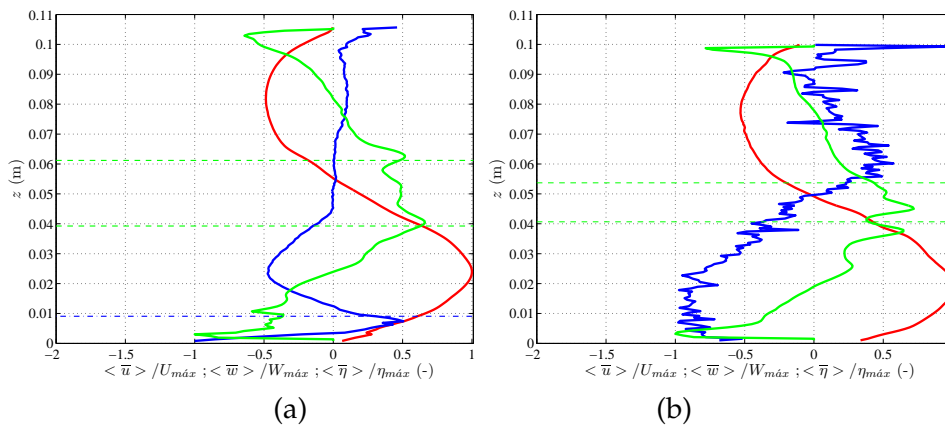


Figura B.1: Velocidade média longitudinal (-) e vertical (-) e vorticidade média (-): a) ensaio R1, posição P1; b) ensaio S1, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

## APÊNDICE B

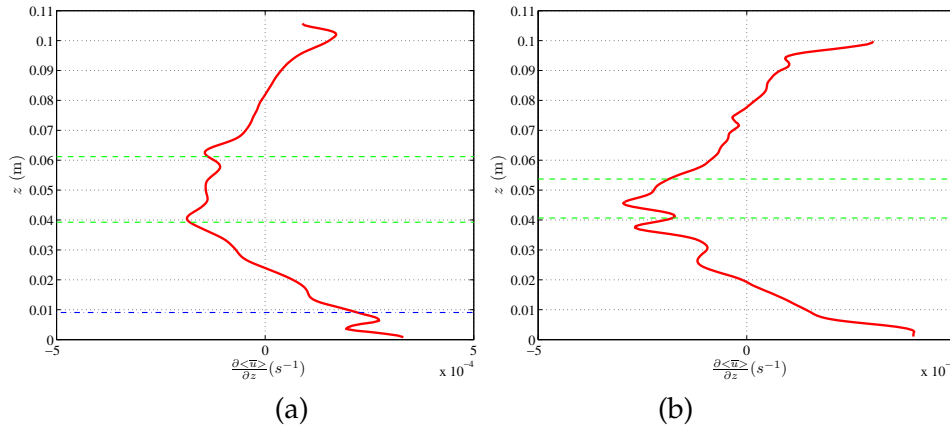


Figura B.2: Gradiente vertical da velocidade longitudinal média: a) ensaio R1; b) ensaio S1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

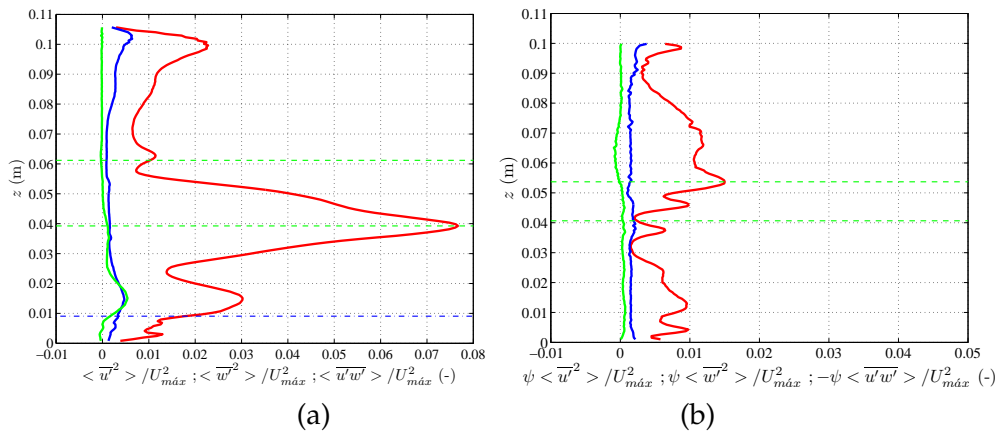


Figura B.3: Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) de Reynolds média: a) ensaio R1, posição P1; b) ensaio S1, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

## B.1. CONJUNTO DE ENSAIOS DA POSIÇÃO P1

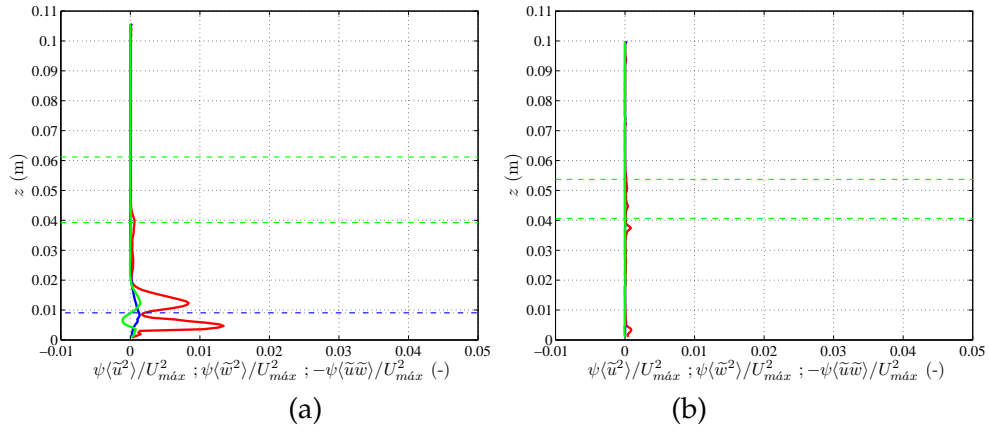


Figura B.4: Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) média dispersivas: a) ensaio R1, posição P1; b) ensaio S1, posição P1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

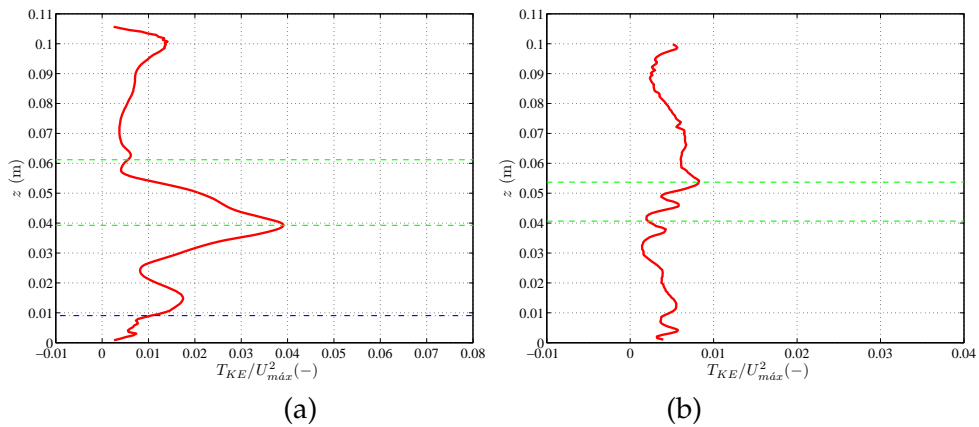


Figura B.5: Energia cinética turbulenta, posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio S1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

## B.2 Conjunto de ensaios da posição P2

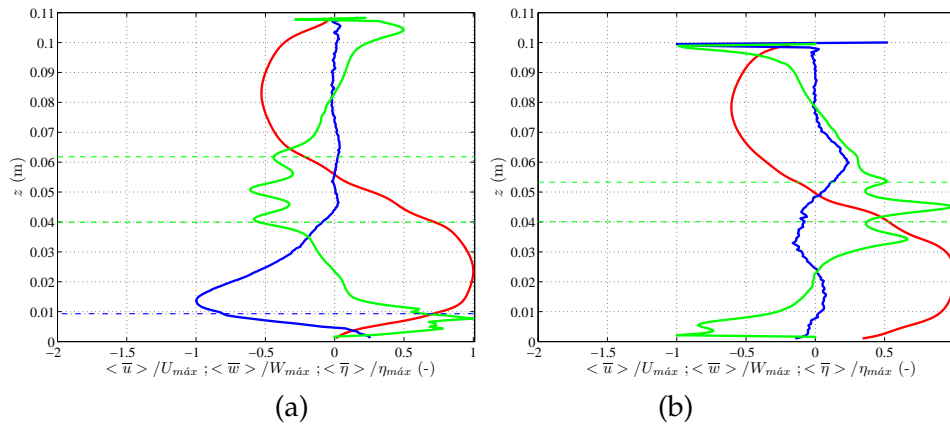


Figura B.6: Velocidade média longitudinal (-) e vertical (-) e vorticidade média (-): a) ensaio R1, posição P2; b) ensaio S1, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

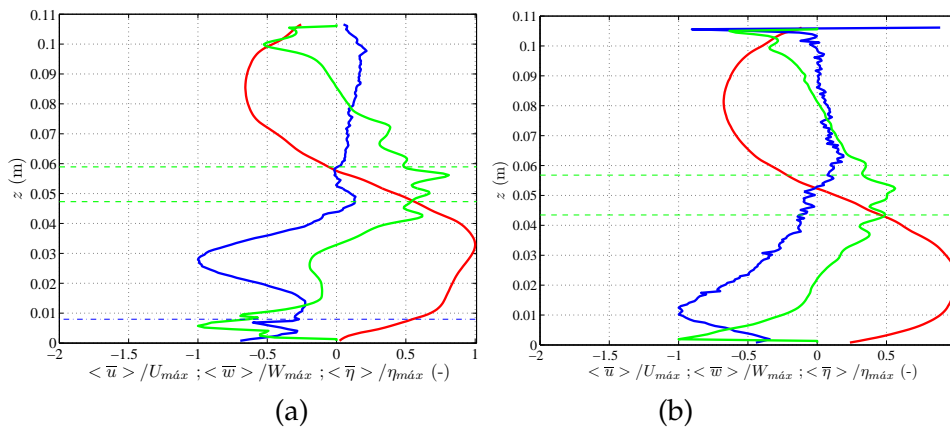


Figura B.7: Velocidade média longitudinal (-) e vertical (-) e vorticidade média (-): a) ensaio R2, posição P2; b) ensaio S2, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

## B.2. CONJUNTO DE ENSAIOS DA POSIÇÃO P2

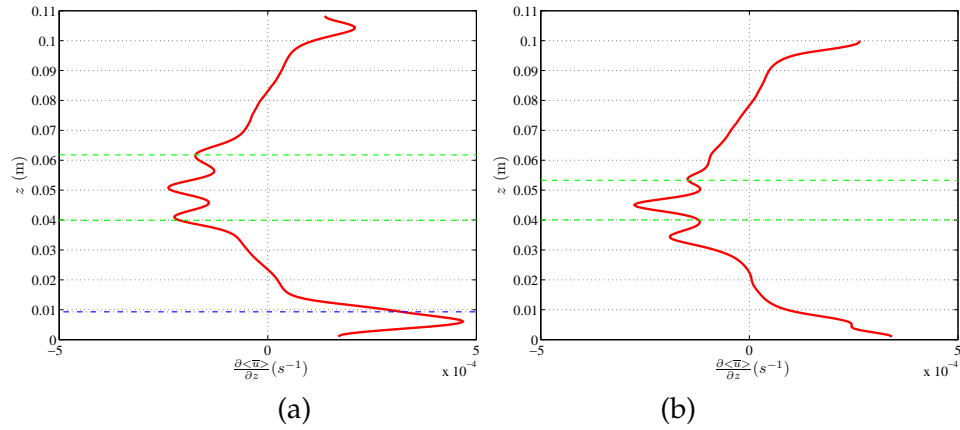


Figura B.8: Gradiente vertical da velocidade longitudinal média: a) ensaio R1; b) ensaio S1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

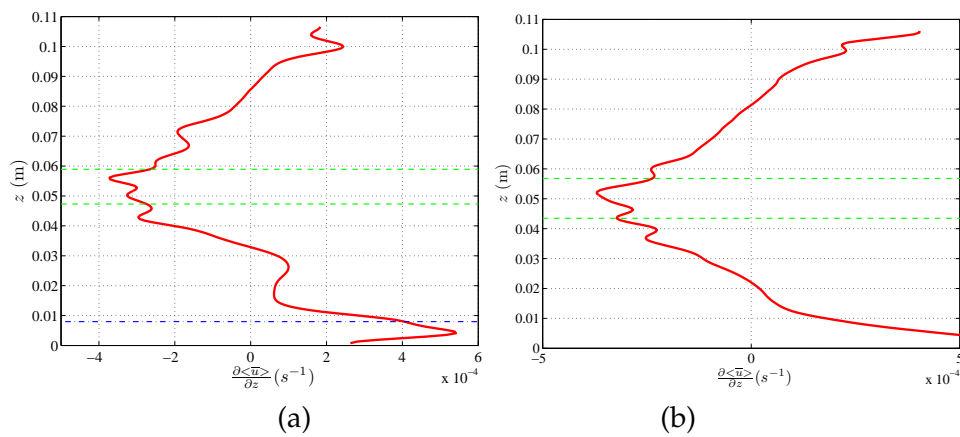


Figura B.9: Gradiente vertical da velocidade longitudinal média: a) ensaio R2; b) ensaio S2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

APÊNDICE B

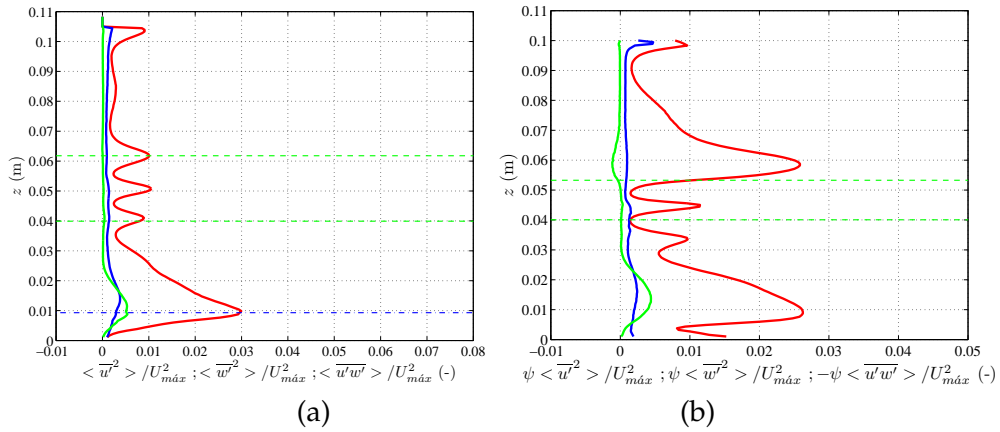


Figura B.10: Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) de Reynolds média: a) ensaio R1, posição P2; b) ensaio S1, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

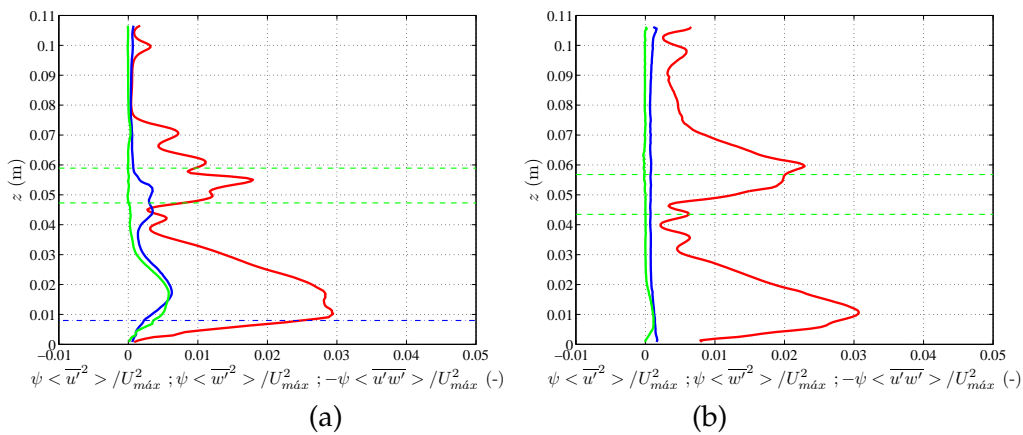


Figura B.11: Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) de Reynolds média: a) ensaio R2, posição P2; b) ensaio S2, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.



## B.2. CONJUNTO DE ENSAIOS DA POSIÇÃO P2

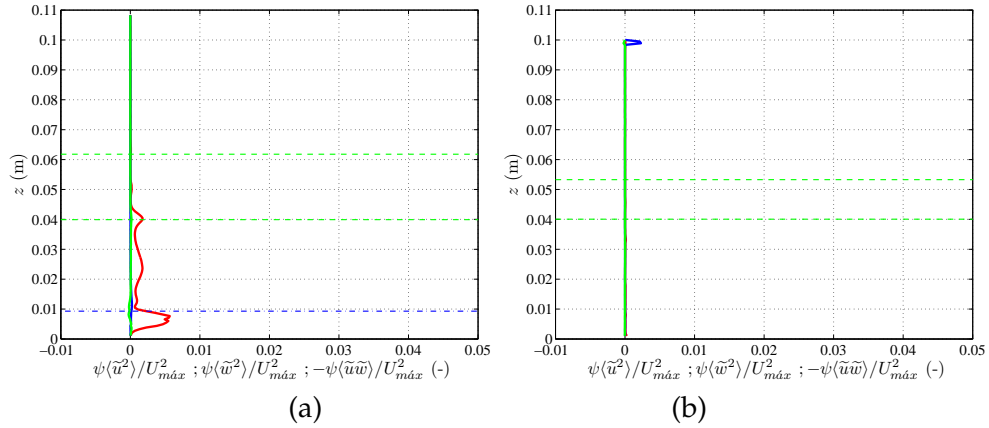


Figura B.12: Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) média dispersivas: a) ensaio R1, posição P2; b) ensaio S1, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

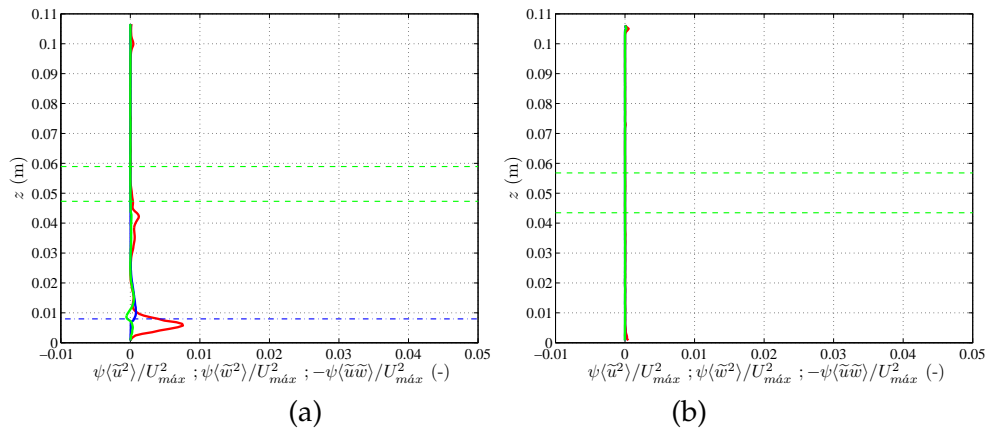


Figura B.13: Tensão normal longitudinal (-) e vertical (-) e tensão tangencial (-) média dispersivas: a) ensaio R2, posição P2; b) ensaio S2, posição P2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

## APÊNDICE B

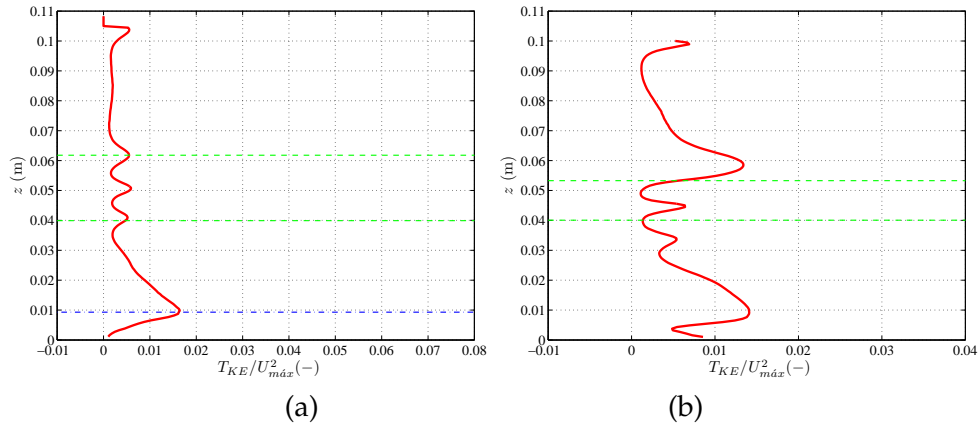


Figura B.14: Energia cinética turbulenta, posição P1: a) ensaio R1; b) ensaio S1. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.

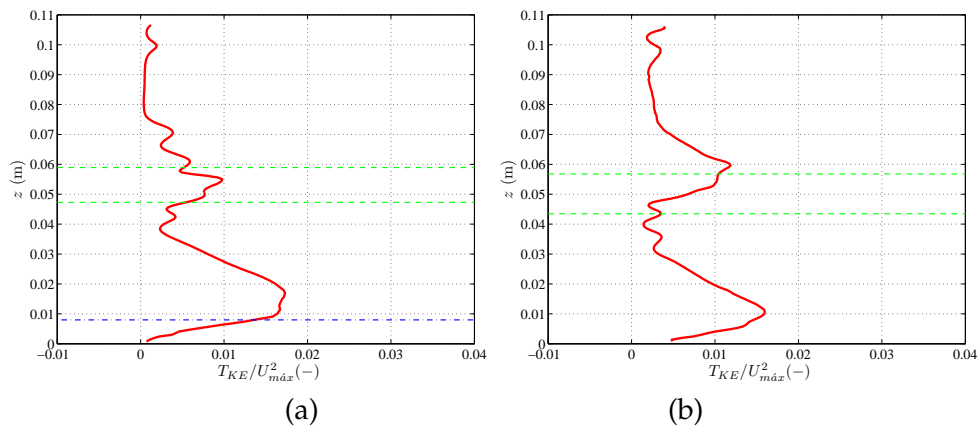


Figura B.15: Energia cinética turbulenta, posição P1: a) ensaio R2; b) ensaio S2. A linha traço-ponto azul corresponde ao plano à crista mais alta do leito e a linha traço-traço verde identifica a zona da camada de mistura.