



TÉCNICO
LISBOA

**Modelação numérica do escoamento deslizante sobre
turbilhões em descarregadores de cheias em degraus:
aplicação a pequenas barragens de aterro**

Inês Sousa Alves Lúcio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professor Doutor Jorge de Saldanha Gonçalves Matos

Professora Doutora Inês Osório de Castro Meireles

Júri

Presidente: Professor Doutor António Alexandre Trigo Teixeira

Orientador: Professor Doutor Jorge de Saldanha Gonçalves Matos

Vogal: Professor Doutor António Alberto do Nascimento Pinheiro

Vogal: Professora Doutora Maria Rita Lacerda Morgado Fernandes de Carvalho
Mesquita David

Dezembro 2015

Agradecimentos

Ao Prof. Jorge de Saldanha Matos, do Instituto Superior Técnico, pela sua orientação, dedicação, por ter estado sempre presente e acreditado em mim. O seu incentivo foi essencial durante todo este percurso.

À Prof. Inês Meireles, da Universidade de Aveiro, pela revisão cuidada que fez dos temas mais delicados da tese e também pelas pertinentes sugestões que permitiram melhorar o meu trabalho.

Ao Eng. Raúl Martín Truchado, da equipa de suporte técnico do FLOW-3D[®], por ter estado sempre disponível para responder a todas as minhas questões técnicas e por toda a sua ajuda.

À Eng. Paula Beceiro, do LNEC, por me ter introduzido ao FLOW-3D[®], e ajudado a dar os primeiros passos neste *software*.

Aos meus pais e irmão, por serem o meu porto de abrigo.

Ao Afonso, por todo o seu apoio na área da mecânica dos fluidos e por ser sempre o meu melhor amigo...!

Resumo

Recentemente, tem-se vindo a constatar que um número significativo de barragens de aterro não satisfazem os requisitos de segurança hidráulico-operacional, em resultado da deficiente capacidade de descarga em situações de cheia excepcional. De entre as usuais medidas de reabilitação, tem vindo a merecer crescente aceitação a utilização de sistemas de proteção para o paramento de jusante de barragens de aterro que permitam o seu galgamento durante cheias excecionais, nomeadamente por meio de estruturas descarregadoras com soleira em degraus de betão compactado por cilindros (BCC).

Nesta dissertação, apresentam-se resultados de um estudo numérico desenvolvido por aplicação do *software* comercial de dinâmica de fluidos computacional (CFD) FLOW-3D®. Os resultados numéricos são comparados com resultados experimentais adquiridos numa instalação experimental representativa de uma pequena barragem de aterro, com declive do paramento de jusante de 1V:2H. Foram realizadas simulações 2D para vários caudais, utilizando o modelo de turbulência RNG $\kappa - \varepsilon$. Os resultados numéricos das alturas de água e da distribuição de velocidades do escoamento ao longo da soleira espessa e do canal descarregador foram validados a partir dos resultados experimentais disponíveis.

Em geral, obteve-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais ao longo da soleira espessa e do canal descarregador. Contudo, a modelação computacional do desenvolvimento da camada limite e da região do escoamento com emulsão de ar, a jusante da secção de afloramento da camada limite, continua a constituir um desafio para futuro trabalho de investigação.

Palavras-chave: Barragens de aterro; descarregadores de cheias em degraus; escoamento deslizando sobre turbilhões; dinâmica de fluidos computacional; FLOW-3D®.

Abstract

Recently, it has been found that a significant number of embankment dams were unable to meet the hydraulic-operational safety requirements, due to inadequate spillway capacity in extreme flood events. Among the usual rehabilitation measures, roller-compacted concrete (RCC) stepped overlays have gained acceptance for providing overtopping protection during extreme flood events.

This dissertation presents a numerical study based on simulations performed with the commercial computational fluid dynamics (CFD) code FLOW-3D[®]. The numerical results are compared with those acquired on an experimental facility representative of a small embankment dam providing for safe overtopping, by means of a 1V:2H sloping stepped chute. FLOW-3D[®] simulations (2D) were performed for several discharges using the RNG $\kappa - \varepsilon$ turbulence model. The numerical results of flow depths and velocity profiles on the broad-crested weir and stepped chute were validated with available experimental data.

In general, a good agreement between numerical and experimental data was obtained in the broad-crested weir as well as in the stepped chute. However, the precise CFD modeling of the boundary layer and the self-aerated flow region, downstream the inception point, remains a challenge for further research.

Keywords: Embankment dams; stepped spillways; skimming flow; computational fluid dynamics; FLOW-3D[®].

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento geral	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização da dissertação	4
2	Revisão bibliográfica	5
2.1	Tipos de escoamento em descarregadores em degraus	5
2.2	Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões	6
2.3	Síntese de estudos numéricos	9
3	Instalação Experimental	11
4	Modelo Matemático	13
4.1	Descrição do campo de escoamento	13
4.2	Equações fundamentais da mecânica dos fluidos	14
4.2.1	Conservação da massa	14
4.2.2	Conservação da quantidade de movimento	16
4.3	Equações adicionais para a modelação de escoamentos turbulentos	20
4.3.1	Caracterização da turbulência	20
4.3.2	Tipos de simulação computacional	22
4.3.3	Equações médias de Reynolds	24
4.3.4	Modelos de turbulência	25
5	Modelo Numérico	31
5.1	Caracterização geral da dinâmica de fluidos computacional	31
5.2	Introdução ao <i>software</i> comercial FLOW-3D®	35
5.2.1	Malha	35
5.2.2	Geometria	36
5.2.3	Método VOF	37
5.2.4	Método FAVOR™	38
5.2.5	Método dos volumes finitos	40
5.2.6	Modelos de turbulência	41

5.2.7	Escalas de turbulência	41
5.2.8	Condições de fronteira e condições iniciais	42
5.2.9	Lei de Parede	43
6	Implementação e calibração do modelo numérico	45
6.1	Geometria	45
6.2	Malha	46
6.3	Condições de fronteira	48
6.4	Condições iniciais e condições finais	49
6.5	Modelos físicos	50
6.6	Opções numéricas	51
6.7	Metodologia para obtenção de grandezas características do escoamento no descarregador	52
6.8	Análises de sensibilidade	53
6.8.1	Convergência	53
6.8.2	Independência da malha	53
6.8.3	Distância adimensional à parede (y^+)	58
6.8.4	Parâmetro TLEN	58
7	Resultados	61
7.1	Caudal	62
7.2	Soleira descarregadora	63
7.2.1	Alturas do escoamento	63
7.2.2	Perfis de velocidade do escoamento	64
7.3	Canal descarregador em degraus	69
7.3.1	Alturas do escoamento	69
7.3.2	Perfis de velocidade do escoamento	73
8	Conclusões. Desenvolvimentos futuros	77
8.1	Conclusões	77
8.2	Desenvolvimentos futuros	79
	Bibliografia	81
	Anexo A Regime permanente	A- 1
	Anexo B Comentário sobre a entrada de ar	B- 3
	Anexo C Observação visual da entrada de ar no canal descarregador	C- 7
	Anexo D Distância adimensional à parede (y^+)	D- 8
D.1	Valores de y^+ para 42 l/s	D- 8
D.2	Valores de y^+ para 56 l/s	D- 12

Anexo E	Ressalto hidráulico	E- 14
Anexo F	Perfis de velocidade na soleira descarregadora para $Q=35$ l/s e $Q=42$ l/s	F- 16
Anexo G	Concentração de ar no canal descarregador	G- 18
Anexo H	Perfis de velocidade no canal descarregador para $Q=35$ l/s	H- 20

Lista de Tabelas

2.1 Síntese de estudos numéricos realizados no âmbito do escoamento em descarregadores em degraus.	10
3.1 Resumo dos ensaios experimentais utilizados na presente dissertação.	11
4.1 Significado dos termos na equação de transporte de k (Meireles, 2011).	27
4.2 Valores das constantes nos modelos propostos por Emmons em 1954 e Glushko em 1965 (CFD Online, 2015, Celik, 1999).	27
4.3 Vantagens e desvantagens do modelo de uma equação (Burnham, 2011a, Celik, 1999).	27
4.4 Significado dos termos nas equações de transporte de k/ε (Meireles, 2011).	28
4.5 Valores das constantes nas equações de transporte para k e ε (Ferziger e Peric, 1997, Celik, 1999).	28
4.6 Vantagens e desvantagens do modelo $k - \varepsilon$ (Burnham, 2011a, Fluent, 2006).	28
4.7 Significado dos termos nas equações de transporte de k/ε (adaptado de Meireles, 2011).	29
4.8 Valores das constantes nas equações de transporte para k e ε (Ferziger e Peric, 1997).	29
4.9 Vantagens e desvantagens do modelo RNG $k - \varepsilon$ (Burnham, 2011a, Flow Science, Inc., 2014).	29
4.10 Significado dos termos nas equações de transporte de k/ω (Meireles, 2011).	30
4.11 Valores das constantes nas equações de transporte para k e ω (Ferziger e Peric, 1997).	30
4.12 Vantagens e desvantagens do modelo $k - \omega$ (Flow Science, Inc., 2014, Frei, 2013).	30
6.1 Descrição das malhas utilizadas no presente estudo.	47
6.2 Comparação entre diferentes valores do parâmetro TLEN simulados.	58
7.1 Resumo das simulações realizadas no presente estudo.	61
7.2 Diferenças relativas entre os caudais experimentais e numéricos nas fronteiras de montante e jusante (malha 4).	62
7.3 Diferenças relativas entre alturas do escoamento experimentais e numéricas: (a) Q=35 l/s e malha 4; (b) Q=42 l/s e malha 4; (c) Q=49 l/s e malha 4; (d) Q=56 l/s e malha 4.	63
7.4 Diferenças relativas entre os números de Froude experimentais e numéricos: (a) Q=35 l/s e malha 4; (b) Q=42 l/s e malha 4; (c) Q=49 l/s e malha 4; (d) Q=56 l/s e malha 4.	64

7.5	Diferenças relativas entre as alturas do escoamento experimentais e numéricas: (a) Q=35 l/s; (b) Q=42 l/s; (c) Q=49 l/s; (d) Q=56 l/s.	72
D.1	Valores de y^+ na soleira para 42 l/s e malha 4.	D- 8
D.2	Valores de y^+ na bacia de dissipação para 42 l/s e malha 4.	D- 9
D.3	Valores de y^+ na soleira para 42 l/s e malha 5.	D- 10
D.4	Valores de y^+ no início da bacia de dissipação para 42 l/s e malha 5.	D- 11
D.5	Valores de y^+ na soleira para 56 l/s e malha 4.	D- 12
D.6	Valores de y^+ no início da bacia para 56 l/s e malha 4.	D- 13

Lista de Figuras

1.1	Barragem de Pedrógão (Fot.: Jorge Matos).	2
1.2	Barragem de Yellow River Watershed No 14, Georgia, EUA, construída em aterro em 1967, reabilitada em 2004 (Fot.: Jorge Matos).	2
1.3	Barragem de Melton, Austrália, construída em aterro em 1916, reabilitada em 1994 (Fot.: Chanson, 2000).	3
2.1	Regiões do escoamento deslizante sobre turbilhões num descarregador em degraus (adaptado de Felder e Chanson, 2009).	7
2.2	(a) vórtices de recirculação nos degraus; (b) ressalto hidráulico com início no pé do descarregador (adaptado de André, 2004).	7
2.3	Representação das variáveis de interesse nos degraus (adaptado de André, 2004).	8
3.1	Instalação experimental: (a) vista geral; (b) escoamento sobre a soleira descarregadora para $Q=49$ l/s; (c) pormenor da cavidade de um degrau na região arejada do escoamento para $Q=35$ l/s; (d) ressalto hidráulico com início no pé do descarregador (Fot.: André e Ramos, 2003).	12
4.1	Perspetiva Lagrangeana (adaptado de Kositgittwong, 2012).	14
4.2	Perspetiva Euleriana (adaptado de Kositgittwong, 2012).	14
4.3	Forças de superfície segundo a direção x que atuam no elemento infinitesimal do fluido em movimento.	16
4.4	Espectro de energia da turbulência em função do número de onda κ (adaptado de Bakker, 2002).	22
4.5	Espectro de energia da turbulência em função do número de onda k e com indicação da gama de aplicação das simulações DNS, LES e RANS (adaptado de Hirsch, 2007).	23
4.6	Modelos de turbulência (adaptado de Meireles, 2011).	25
5.1	Relações entre os conceitos de consistência, estabilidade e convergência (adaptado de Hirsch, 2007).	33
5.2	Exemplos de gráficos obtidos através do pós-processador do código comercial FLOW-3D® (Flow Science, Inc., 2015).	34

5.3	À esquerda, exemplo de uma malha uniforme; à direita, exemplo de uma malha não uniforme (Burnham, 2011a).	35
5.4	À esquerda: alinhamento entre células a evitar; à direita: alinhamento aconselhado (adaptado de Burnham, 2011a).	36
5.5	Valores típicos para F' perto de uma superfície livre (Hirt e Nichols, 1981).	37
5.6	Casos A, B e C: consequências da aplicação do método FAVOR™ (adaptado de Burnham, 2011a).	38
5.7	Localização das variáveis numa célula de malha desfasada (<i>staggered grid</i>) (Vanneste, 2012).	40
5.8	Região interior da camada limite e valores de y^+ recomendados (adaptado de CFD Online, 2015).	44
6.1	(a) FAVORize da geometria importada por .stl; (b) FAVORize da geometria construída componente a componente.	45
6.2	Geometria.	46
6.3	Bloco 1 (a azul) e Bloco 2 (a verde).	47
6.4	Alinhamento entre os Blocos 1 e 2.	48
6.5	Número de Froude na fronteira de jusante, $X_{m\acute{a}x}$.	49
6.6	Eixos utilizados no estudo das grandezas características do descarregador.	52
6.7	Coordenadas a rosa: (a) coordenadas do ficheiro <i>transf.in</i> para obtenção do perfil de velocidades na vertical 4; (b) coordenadas do ficheiro <i>transf.in</i> para obtenção da altura do escoamento relativamente à soleira fictícia.	52
6.8	Monitorização do critério da convergência durante o decorrer de uma das simulações efetuadas.	53
6.9	Perfis de velocidade na secção 2 da soleira descarregadora para $q=0.05m^2$.	54
6.10	Perfis de velocidade em 4 secções da soleira descarregadora para $q=0.05m^2$.	54
6.11	Alturas de água na soleira descarregadora para $q=0.05m^2$.	55
6.12	Alturas do escoamento no canal descarregador para $q=0.05m^2$.	55
6.13	Campo de concentração de ar: (a) malha 3; (b) malha 4; (c) malha 5.	56
6.14	Perfis de velocidade no canal descarregador em degraus para $q=0.05m^2$ (a) vertical 2 ; (b) vertical 4.	57
6.15	Comparação entre as malhas 4 e 5 para $q=0.05m^2$ perfis de velocidade em quatro verticais do canal descarregador em degraus.	57
6.16	Comparação das alturas do escoamento calculadas com diferentes valores de TLEN ($Q=42$ l/s e malha 4).	59
6.17	Campo de concentração de ar: (a) TLEN calculado automaticamente; (b) TLEN=0.008.	59
6.18	Escala de comprimentos turbulentos (m): (a) TLEN calculado automaticamente; (b) TLEN=0.008.	60
6.19	Energia turbulenta (J/kg): (a) TLEN calculado automaticamente; (b) TLEN=0.008.	60
7.1	Evolução temporal do caudal nas fronteiras de montante e jusante.	62

7.2	Alturas do escoamento na soleira: comparação entre resultados experimentais e numéricos.	63
7.3	Alturas do escoamento na soleira adimensionalizadas pelo comprimento da soleira. . . .	64
7.4	Perfis de velocidade do escoamento na soleira: (a) $Q=35$ l/s e malha 4; (b) $Q=42$ l/s e malha 4; (c) $Q=49$ l/s e malha 4; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.	65
7.5	Perfis de velocidade na soleira: (a) secção 1; (b) secção 2; (c) secção 3; (d) secção 4. . .	66
7.6	Perfis de velocidade experimentais e numéricos na soleira para $Q=49$ l/s e malha 4: (a) secção 1; (b) secção 2; (c) secção 3; (d) secção 4.	67
7.7	Perfis de velocidade experimentais e numéricos para $Q=56$ l/s e malha 4: (a) secção 1; (b) secção 2; (c) secção 3; (d) secção 4.	68
7.8	Esquema ilustrativo da ondulação da superfície livre nos degraus (adaptado de André, 2004).	69
7.9	Campo de concentração de ar e linhas de corrente do escoamento no 7.º degrau.	69
7.10	Campo de concentração de ar e linhas de corrente do escoamento no núcleo do vórtice de recirculação no 7.º degrau	70
7.11	Alturas do escoamento no canal descarregador em degraus: (a) $Q=35$ l/s e malha 5; (b) $Q=42$ l/s e malha 5; (c) $Q=49$ l/s e malha 5; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.	70
7.12	Alturas do escoamento obtidas numericamente para os caudais em estudo.	73
7.13	Perfis de velocidade no canal descarregador em degraus: (a) $Q=35$ l/s e malha 5; (b) $Q=42$ l/s e malha 5; (c) $Q=49$ l/s e malha 5; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.	74
7.14	Comparação entre perfis de velocidade experimentais e numéricos no canal descarregador para $Q=42$ l/s e malha 5: (a) vertical 2; (b) vertical 3; (c) vertical 4; (d) vertical 5; (e) vertical 6; (f) vertical 7.	76
A.1	Energia cinética média do escoamento (J/kg).	A- 1
A.2	Energia cinética turbulenta média (J/kg).	A- 1
A.3	Dissipação média da energia cinética turbulenta (J/kg/s).	A- 2
A.4	Massa de fluido total (kg).	A- 2
B.1	Comparação de perfis de velocidade na soleira descarregadora em simulações com e sem tensão superficial: (a) secção 2; (b) secção 3 ($Q=35$ l/s e malha 4).	B- 4
B.2	Comparação das alturas do escoamento no canal descarregador em degraus em simulações com e sem tensão superficial ($Q=35$ l/s e malha 4).	B- 4
B.4	Campo de concentração de ar: (a) com tensão superficial ; (b) sem tensão superficial ($Q=35$ l/s e malha 4).	B- 6
C.1	Observação visual da entrada de ar no canal descarregador em degraus: (a) $Q=35$ l/s; (b) $Q=42$ l/s; (c) $Q=49$ l/s; (d) $Q=56$ l/s (Fot.: André e Ramos, 2003).	C- 7
E.1	Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t= 22$ s.	E- 14
E.2	Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t= 33$ s.	E- 14
E.3	Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t= 54$ s.	E- 15

E.4	Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t= 77s$	E- 15
E.5	Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t= 100s$	E- 15
E.6	Número de Froude do escoamento na proximidade do ressalto hidráulico.	E- 15
F.1	Comparação entre perfis experimentais e numéricos na soleira descarregadora para $Q=35$ l/s e malha 4: (a) secção 1; (b) secção 2; (c) secção 3; (d) secção 4.	F- 16
F.2	Comparação entre perfis experimentais e numéricos na soleira descarregadora para $Q=42$ l/s e malha 4: (a) secção 1; (b) secção 2; (c) secção 3; (d) secção 4.	F- 17
G.1	Concentração de ar: (a) $Q=35$ l/s e malha 5; (b) $Q=42$ l/s e malha 5; (c) $Q= 49$ l/s e malha 5; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.	G- 18
H.1	Comparação entre perfis de velocidade experimentais e numéricos no canal descarregador para $Q=35$ l/s e malha 5: (a) vertical 2; (b) vertical 3; (c) vertical 4; (d) vertical 5; (e) vertical 6; (f) vertical 7.	H- 20

Lista de Símbolos

Símbolos gregos

δ	Espessura da camada limite
η	Propriedade intensiva
γ	Peso volúmico
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Densidade
σ	Tensão superficial
τ_w	Tensão de corte na parede
θ	Ângulo que a soleira fictícia do canal (entendida como a envolvente das extremidades dos degraus) faz com a horizontal

Símbolos romanos

C_f	Coeficiente de tensão de corte superficial
Fr	Número de Froude
Fr_*	Número de Froude definido em função da rugosidade da superfície
L_i	Distância medida desde o início do descarregador até à secção de afloramento da camada limite
N	Propriedade extensiva
Re	Número de Reynolds
V_{max}	Velocidade potencial
L	Distância ao longo do descarregador
Q	Caudal
V	Velocidade pontual do escoamento

k_d	Rugosidade de forma definida pelos degraus
u	Componente da velocidade segundo x
u^+	Velocidade longitudinal adimensional
u_τ	Velocidade de atrito
v	Componente da velocidade segundo y
w	Componente da velocidade segundo z
y^+	Distância adimensional à parede
g	Aceleração da gravidade
h	Altura do escoamento
h_c	Altura crítica do escoamento
h_d	Altura do degrau
q	Caudal unitário
y	Coordenada medida segundo a normal à soleira descarregadora ou segundo a normal à soleira fictícia do canal descarregador em degraus

Acrónimos

ACI	American Concrete Institute
BCC	Betão Compactado por Cilindros
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
FAVOR	Fractional Area-Volume Obstacle Representation
GUI	Graphical User Interface
IST	Instituto Superior Técnico
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RCC	Roller-Compacted Concrete
RNG	Re-Normalisation Group
TLEN	Maximum Turbulent Length Scale
VOF	Volume Of Fluid

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento geral

Os descarregadores de cheias em degraus revestem-se atualmente de assinalável importância, não só por uma questão de segurança da estrutura hidráulica, mas porque permitem em geral a redução do custo das obras de dissipação de energia a jusante do descarregador. Na presença deste tipo de descarregadores, a dissipação de energia é feita, em grande parte, na própria soleira descarregadora, devido à macro-rugosidade conferida pelos degraus, pelo que é possível reduzir ou, eventualmente, eliminar a estrutura de dissipação de energia a instalar a jusante do descarregador.

A construção de descarregadores de cheias de barragens em degraus remonta à Antiguidade (Chanson, 2002), mas tem vindo a ser fortemente implementada nas últimas três décadas, devido, em grande parte, à utilização da técnica de betão compactado por cilindros (BCC). O betão compactado por cilindros é definido, segundo a American Concrete Institute (ACI), como um betão que, no seu estado não endurecido, suporta o equipamento de compactação enquanto está a ser compactado (USACE, 2000). Caracteriza-se por ser um betão seco consolidado por vibração externa forte, constituído por agregados com diferentes granulometrias, ligantes, água e eventualmente adjuvantes, diferindo do betão convencional pelo método de colocação e pela sua consistência que permite a circulação de equipamentos pesados como camiões e cilindros de compactação sobre as sucessivas camadas colocadas. A sua aplicação na construção de barragens é feita, geralmente, através do espalhamento de camadas com espessura usual de 300 mm (espessura que assegura um melhor grau de compactação com os equipamentos de compactação habituais neste tipo de barragens), sendo depois compactadas por cilindros (Marques, 2008). Este método de colocação em camadas horizontais facilita a construção de degraus, pelo que esta técnica tem vindo a ser muito utilizada na construção de barragens com descarregadores de cheias em degraus. Segundo o US Army Corps of Engineers (USACE, 2000), a utilização da técnica de BCC na construção de uma barragem permite a redução do custo da mesma em cerca de 25 a 50%, comparativamente à construção com betão convencional. Este facto deve-se, essencialmente, à fácil colocação deste betão e em menores períodos de tempo do que o betão convencional.

Em Portugal, foi inaugurada em 2006 a barragem de Pedrógão, que é uma barragem de gravidade e foi a primeira no país a ser construída com utilização intensiva de BCC. A descarga do caudal de cheia é feita sobre o paramento de jusante da barragem, em degraus.



Figura 1.1: Barragem de Pedrógão (Fot.: Jorge Matos).

Por outro lado, recentes reanálises de caudais de dimensionamento de descarregadores de cheia de pequenas barragens de aterro em diversos países revelaram que muitas destas não dispõem de uma adequada capacidade de descarga, o que poderá, em situações excecionais, conduzir ao galgamento da barragem, o que acarreta um elevado risco, caso não se disponha de um sistema de proteção do paramento de jusante. Com efeito, a elevada velocidade e energia do escoamento resultante do galgamento podem danificar o paramento de jusante e conduzir à erosão na base do descarregador o que, em casos extremos, poderá danificar consideravelmente ou levar à destruição da barragem. De entre os vários sistemas de proteção disponíveis, a construção de descarregadores de cheias em degraus de BCC sobre o paramento de jusante de barragens de aterro é uma opção que tem vindo a ser fortemente implementada, nomeadamente nos EUA. Nas Figs. 1.2 e 1.3 apresentam-se alguns exemplos deste tipo de reabilitação realizada em barragens de aterro.



Figura 1.2: Barragem de Yellow River Watershed No 14, Georgia, EUA, construída em aterro em 1967, reabilitada em 2004 (Fot.: Jorge Matos).



Figura 1.3: Barragem de Melton, Austrália, construída em aterro em 1916, reabilitada em 1994 (Fot.: Chanson, 2000).

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal a implementação de um modelo numérico de um descarregador de cheias em degraus, com paramento de jusante de declive 1V:2H, representativo de uma pequena barragem de aterro, e a sua validação com base em resultados experimentais previamente adquiridos no âmbito de outras dissertações. Enumeram-se, de seguida, os objetivos que orientaram o estudo realizado:

- comparar resultados numéricos e experimentais relativos à altura e distribuição de velocidades do escoamento numa soleira espessa;
- comparar resultados numéricos e experimentais relativos à altura e distribuição de velocidades do escoamento deslizante sobre turbilhões no canal descarregador em degraus;
- aferir, qualitativamente e com base em simulações computacionais, a secção de entrada de ar no escoamento deslizante sobre turbilhões no canal descarregador em degraus;
- realizar análises de sensibilidade a alguns parâmetros computacionais para deste modo aferir o seu impacto nos resultados numéricos obtidos;
- avaliar as potencialidades e limitações da utilização de um *software* de CFD na simulação do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores em degraus.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos.

No presente capítulo introdutório, faz-se uma breve abordagem à temática dos descarregadores de cheias em degraus e apresentam-se os objetivos e organização da dissertação.

No **Capítulo 2** descrevem-se resumidamente os tipos de escoamento que podem ocorrer em descarregadores de cheias em degraus e caracteriza-se, mais detalhadamente, o escoamento deslizante sobre turbilhões. Apresenta-se também uma referência a alguns estudos numéricos realizados sobre a temática da presente dissertação, bem como uma descrição sumária das suas principais características.

No **Capítulo 3** apresenta-se a instalação experimental na qual foram realizados os ensaios experimentais utilizados na validação dos resultados numéricos e é feita uma breve referência à aparelhagem de medição. Estes ensaios foram realizados por outros autores no âmbito das respetivas dissertações.

No **Capítulo 4** apresenta-se o modelo matemático subjacente à dinâmica de fluidos computacional.

O **Capítulo 5** é iniciado com uma breve caracterização geral da dinâmica de fluidos computacional, sendo depois dedicado à descrição do *software* comercial FLOW-3D[®], com o qual foram realizadas as simulações numéricas.

No **Capítulo 6** descreve-se a implementação do modelo numérico em estudo e a sua calibração mediante a realização de análises de sensibilidade.

No **Capítulo 7** apresentam-se os resultados numéricos obtidos nas simulações realizadas e procede-se à validação dos mesmos por comparação com os resultados experimentais.

O **Capítulo 8** contém as principais conclusões retiradas do presente estudo e algumas sugestões para futuro trabalho de investigação.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Tipos de escoamento em descarregadores em degraus

O tipo de escoamento que ocorre em canais com soleira em degraus é função do caudal e da geometria dos degraus, pelo que, para um dado descarregador, pode ocorrer, com o aumento gradual do caudal, escoamento em quedas sucessivas, escoamento de transição e escoamento deslizante sobre turbilhões (e.g., Essery e Horner, 1978, Diez-Cascon et al., 1991, Elviro e Mateos, 1995, Ohtsu e Yasuda, 1997, Matos, 1999, Fael, 2000, Chanson, 2002, Meireles, 2004).

O escoamento em quedas sucessivas ocorre normalmente para valores baixos de caudal e de declive da soleira do descarregador e caracteriza-se por uma sucessão de quedas livres. Este tipo de escoamento pode ser subdividido em três subtipos, em função do caudal: escoamento em quedas sucessivas com ocorrência de ressalto hidráulico na soleira, escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jato na soleira do degrau e escoamento em quedas sucessivas com impacto parcial do jato na soleira do degrau (e.g., Chanson, 1994, Matos e Quintela, 1997, Fael, 2000, Pinheiro e Fael, 2000, Chanson, 2002). No escoamento em quedas sucessivas, a energia é dissipada por meio da fragmentação do jato no ar, no impacto do jato no degrau e, eventualmente, no ressalto hidráulico. Em alguns estudos, experimentais ou numéricos, é também objeto de análise o escoamento em descarregadores em degraus com macro-rugosidades ou travessões (e.g. Fael, 2000, Pinheiro e Fael, 2000, André, 2004), ou macro-rugosidades e soleiras descarregadoras na extremidade de cada degrau (Carvalho e Martins, 2009).

O escoamento deslizante sobre turbilhões é composto por um escoamento principal que se escoia sobre uma soleira fictícia, definida pela envolvente das extremidades dos degraus, e por um escoamento secundário turbilhonar que ocupa as cavidades formadas pelos degraus. Este tipo de escoamento pode ser subdividido nos seguintes sub-tipos: escoamento deslizante sobre turbilhões com preenchimento parcial da soleira do degrau pelo escoamento secundário, escoamento deslizante sobre turbilhões com preenchimento praticamente integral da soleira do degrau pelo escoamento secundário e escoamento deslizante sobre turbilhões com recirculação estável do escoamento secundário (e.g., Chanson, 1994, Chanson, 2002). No escoamento deslizante sobre turbilhões, a energia é, em grande

parte, dissipada nos vórtices que se desenvolvem nas cavidades dos degraus (e.g. Rajaratnam, 1990, Chanson, 1994, Matos, 1999, Chanson, 2002, Meireles, 2004).

Vários autores estabeleceram critérios que permitem estimar as condições de início e fim de cada tipo de escoamento (Ohtsu e Yasuda, 1997, Matos, 1999, Fael, 2000, Chanson, 2002).

Em descarregadores em degraus sem macro-rugosidades ou travessões, a influência do declive do canal na condição de início de ocorrência de escoamento de transição ou deslizante sobre turbilhões é relativamente pequena, em particular para declives típicos do paramento de jusante de barragens de betão ou de aterro. Com efeito, para declives compreendidos entre 1V:0.75H e 1V:2H, o início do escoamento de transição ocorre para valores de hc/hd entre cerca de 0.5 a 0.7, enquanto que o início do escoamento deslizante sobre turbilhões ocorre para valores de hc/hd compreendidos entre cerca de 0.8 a 1.0, respetivamente (Matos e Meireles, 2014).

As simulações numéricas realizadas no presente estudo foram efetuadas para condições respeitantes ao escoamento deslizante sobre turbilhões.

2.2 Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões

O escoamento deslizante sobre turbilhões apresenta usualmente duas regiões distintas, a montante e a jusante da secção de afloramento da camada limite, designadas por região não arejada (sem emulsão de ar no seio do escoamento) e a região arejada (Fig. 2.1).

Na região sem emulsão de ar, em que a camada limite se vai desenvolvendo, a superfície livre é sensivelmente lisa, ou seja, sem ondulação apreciável, em particular num trecho inicial. Quando a camada limite atinge a superfície livre e as forças desestabilizadoras do escoamento associadas à turbulência são superiores às forças estabilizadoras associadas à tensão superficial e à gravidade, dá-se a entrada de ar no escoamento (Chanson, 2002, Hirt, 2003, Meireles et al., 2014). A secção inicial de entrada de ar é usualmente designada secção de afloramento da camada limite. Na proximidade desta secção, a superfície do escoamento torna-se mais ondulada. Na região arejada de um descarregador com grande extensão, podem distinguir-se três trechos distintos: um trecho inicial com emulsão de ar parcialmente desenvolvido, a que se segue um trecho com arejamento completamente desenvolvido e, eventualmente mais a jusante, um trecho em regime uniforme. Neste tipo de regime, as grandezas características do escoamento, como altura equivalente de água, concentração média de ar, distribuição da concentração de ar e distribuição de velocidades do escoamento tornam-se praticamente constantes ao longo do percurso (e.g. Chanson, 1994, Matos, 1999, Chanson, 2002, Meireles, 2004).

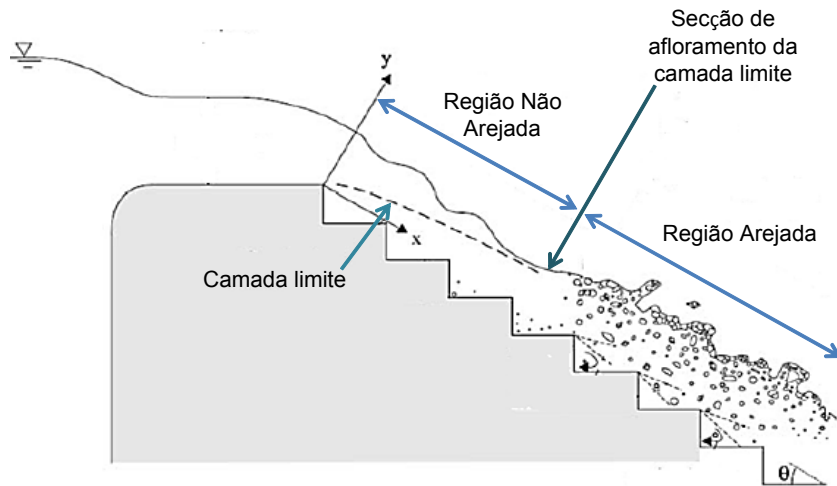
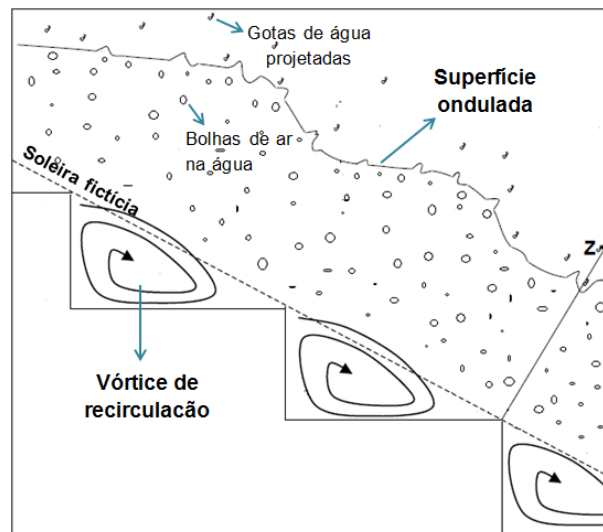
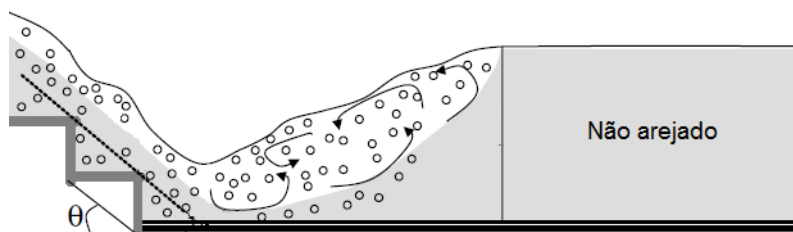


Figura 2.1: Regiões do escoamento deslizante sobre turbilhões num descarregador em degraus (adaptado de Felder e Chanson, 2009).

A Fig. 2.2 ilustra os vórtices de recirculação característicos do escoamento turbilhonar que ocorre nas cavidades formadas pelos degraus (Fig. 2.2a), bem como o ressalto hidráulico numa bacia de dissipação de energia a jusante do descarregador (Fig. 2.2b).



(a)



(b)

Figura 2.2: (a) vórtices de recirculação nos degraus; (b) ressalto hidráulico com início no pé do descarregador (adaptado de André, 2004).

Secção de afloramento da camada limite

Vários autores, tais como Chanson (2002), Boes e Hager (2003), Meireles e Matos (2009) e Hunt e Kadavy (2013), têm proposto expressões para estimar a localização da secção de afloramento da camada limite e a altura do escoamento naquela secção, em função da rugosidade de forma definida pelos degraus, k_d e do número de Froude definido em função da rugosidade da superfície, F_* . Hunt e Kadavy (2013) propõem as seguintes expressões:

$$\frac{L_i}{k_d} = 5.19(F_*)^{0.89} \quad 0.1 < F_* \leq 28 \quad (2.1)$$

$$\frac{L_i}{k_d} = 7.48(F_*)^{0.78} \quad 28 < F_* \leq 10^5 \quad (2.2)$$

em que L_i é a distância medida segundo a soleira fictícia desde a crista do descarregador até à secção de afloramento da camada limite; $k_d = h_d \cos \theta$; h_d é a altura do degrau; θ é o ângulo entre a soleira fictícia e o plano horizontal; $F_* = \frac{q}{[g(\sin \theta)k_d^3]^{0.5}}$; q é o caudal unitário e g a aceleração da gravidade (Fig. 2.3).

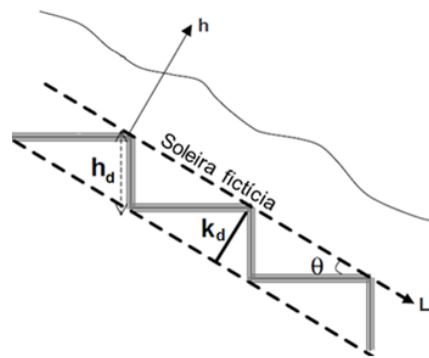


Figura 2.3: Representação das variáveis de interesse nos degraus (adaptado de André, 2004).

Distribuição de velocidades

A distribuição adimensional de velocidades na região não arejada do escoamento em descarregadores de cheias em degraus pode ser expressa através de uma expressão do tipo:

$$\frac{V}{V_{max}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{N}} \quad 0 < y/\delta < 1 \quad (2.3)$$

em que:

- V é a velocidade pontual do escoamento à distancia y da soleira fictícia;
- V_{max} é a velocidade do escoamento na região exterior à camada limite;
- y é a coordenada medida segundo a normal à soleira fictícia;
- δ é a espessura da camada limite definida como sendo a distância da soleira, segundo a normal, ao ponto onde a velocidade do escoamento é 99% da velocidade do escoamento potencial;
- N é um parâmetro da distribuição adimensional de velocidades.

Diversos autores têm apresentado estimativas para N a partir de ensaios experimentais. A título de exemplo, para o escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores em degraus com declives de cerca de 1V:3H (Chanson, 2002) e 1V:2H (Meireles e Matos, 2009), obtiveram-se valores iguais a cerca de 5.

Outro tipo de funções tem também vindo a ser usado para descrever a distribuição adimensional de velocidades na região não arejada do escoamento. Cheng e Gulliver (2011) propõem a utilização de uma função de esteira e comentam a sua aplicabilidade e vantagens em relação a funções exponenciais (como a Eq. 2.3). Cheng et al. (2014) propõem a utilização de uma lei logarítmica e estimam, com base em ensaios experimentais, valores para os seus parâmetros.

2.3 Síntese de estudos numéricos

Nas últimas décadas, os avanços tecnológicos na área do *hardware* e *software* permitiram o desenvolvimento de programas computacionais com aplicação no domínio da dinâmica de fluidos. Os modelos numéricos podem constituir um complemento aos estudos experimentais na análise do escoamento em descarregadores de cheias, sendo úteis na fase de conceção e projeto de estruturas deste tipo. Na Tabela 2.1, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica de alguns estudos numéricos realizados sobre descarregadores em degraus, bem como uma descrição sumária das suas principais características.

Tabela 2.1: Síntese de estudos numéricos realizados no âmbito do escoamento em descarregadores em degraus.

Referência bibliográfica	Software Comercial	Modelo da superfície livre	Modelo de turbulência	Declive (V:H)	Número de degraus	Tipo de Malha	Caudal (m ² /s)	Grandezas comparadas com dados experimentais
Tabbara et al. (2005)	ADINA-F	<i>Re-meshing</i>	$k - \varepsilon$	1:0.75	-	Não estruturada	-	Alturas do escoamento
Cheng et al. (2006)	FLUENT	MMF	RNG $k - \varepsilon$	1:0.75	13	Não estruturada	-	Velocidades, entrada de ar e perfis de pressão
Arantes (2007)	ANSYS CFX 10.0	Partial VOF	Tensões de Reynolds	1:0.75	-	Não estruturada	0.0688-0.201	Velocidades, alturas do escoamento
Qian et al. (2009)	-	VOF	Realizable $k - \varepsilon$, SST $k - \omega$, $v^2 - f$, LES	1:0.8	40	-	0.11	Velocidades, vorticidade, espessura da camada limite
Carvalho e Amador (2008)	-	VOF	-	1:0.8	-	-	0.11	Velocidades, intensidade da turbulência
Bombardelli et al. (2010) Meireles (2011)	FLOW-3D®	TruVOF	$k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$	1:0.75	-	Estruturada	0.08, 0.14, 0.18	Alturas do escoamento, velocidades e desenvolvimento da camada limite
Meireles et al. (2010) Meireles (2011)	FLOW-3D®	TruVOF	RNG $k - \varepsilon$	1:2	10	Estruturada	0.05, 0.06, 0.07	Alturas do escoamento, velocidades
Kositgittwong (2012)	FLUENT	VOF e MMF	Standard $k - \varepsilon$ Standard $k - \omega$ RNG $k - \varepsilon$, SSR $k - \omega$ Realizable $k - \varepsilon$	1:2	Liso; 25; 50	Estruturada	0.47; 0.92 1.38;1.87 2.33	Alturas do escoamento, velocidades, intensidade da turbulência, dissipação da energia
Cheng et al. (2014)	FLUENT	VOF	RNG $k - \varepsilon$	1:6.5 -1:0.75	68; 40, 13	Não estruturada	0.067- 0.899	Velocidades, altura do escoamento
Valero e Bung (2015)	FLOW-3D®	TruVOF	RNG $k - \varepsilon$	1:2	23	Estruturada	0.07 0.09 0.11	Alturas do escoamento, velocidades, concentrações de ar
Presente estudo	FLOW-3D®	TruVOF	RNG $k - \varepsilon$	1:2	10	Estruturada	0.05; 0.06 0.07; 0.08	Velocidades e alturas do escoamento na soleira e descarregador

Capítulo 3

Instalação Experimental

Os ensaios experimentais que permitiram a validação do presente estudo foram realizados no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do IST, no âmbito do trabalho de investigação desenvolvido por André e Ramos (2003) e Cabrita (2007), numa instalação experimental readaptada a partir da instalação utilizada por Fael (2000), no âmbito da sua dissertação de mestrado. A instalação compreende circuitos de alimentação e recirculação de água, um reservatório de alimentação, um canal de secção transversal retangular no qual se insere o descarregador, e um compartimento de restituição. O canal, com 8 m de comprimento e 0.7 m de largura, é constituído por uma bacia de montante, um descarregador em degraus e uma bacia de dissipação. A jusante, o canal possui uma comporta de charneira articulada na base que permite regular a localização do ressalto hidráulico que ocorre a jusante do descarregador. O descarregador, construído em PVC e com 0.5 m de altura, é constituído por uma soleira horizontal com 0.5 m de comprimento e um canal descarregador em degraus com 0.9 m de comprimento. Na parede vertical, imediatamente a montante da soleira, incorporou-se uma estrutura cilíndrica por forma a reduzir a perturbação e separação do escoamento à entrada do descarregador (Fael, 2000, André e Ramos, 2003, Cabrita, 2007). Do ponto de vista hidráulico, a soleira reúne as condições necessárias para ser classificada como soleira espessa, assegurando que o regime crítico do escoamento ocorre na soleira para os caudais analisados. O canal descarregador possui dez degraus e forma um ângulo de 26.6° com a horizontal, o que corresponde a um declive de 1V:2H. Os ensaios experimentais realizados por André e Ramos (2003) e Cabrita (2007), que foram objeto de análise comparativa no presente estudo, constam da Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Resumo dos ensaios experimentais utilizados na presente dissertação.

Referência bibliográfica	Declive	Altura do degrau	N.º degraus	Caudal (m ² /s)	Medições na soleira	Medições nos degraus
André e Ramos (2003)	1V:2H	5 cm	10	0.05; 0.06 0.07; 0.08	-	Altura do escoamento junto da parede esquerda; perfis de velocidade para os dois menores caudais
Cabrita (2007)	1V:2H	5 cm	10	0.05; 0.06 0.07; 0.08	Altura do escoamento e perfis de velocidade	

Na soleira descarregadora, as medições da altura e velocidade do escoamento foram efetuadas em quatro secções (1, 2, 3 e 4), respetivamente a 12.5, 25.0, 37.5 e 46.4 cm do início da soleira horizontal. As alturas do escoamento nas primeiras três secções foram medidas com recurso a um hidrómetro, por sua vez instalado num coordinómetro. A altura do escoamento na secção 4 corresponde à leitura efetuada com o tubo de carga total. O cálculo das velocidades foi efetuado a partir da medição da carga total com base num tubo de carga total e admitindo a distribuição hidrostática de pressões.

No canal descarregador, a medição de alturas do escoamento foi efetuada por observação visual mediante colocação de fitas métricas nas paredes laterais do canal, na direção normal à soleira fictícia. Os perfis de velocidade do escoamento nas verticais dos degraus foram obtidos mediante a utilização de um tubo de Pitot. Em André e Ramos (2003), encontra-se informação relativa à localização da secção de afloramento da camada limite, obtida por observação visual na zona central e nas paredes laterais do descarregador. Nesse estudo apresentam-se também resultados obtidos na bacia de dissipação de energia, como sejam as alturas do escoamento ao longo do ressalto.

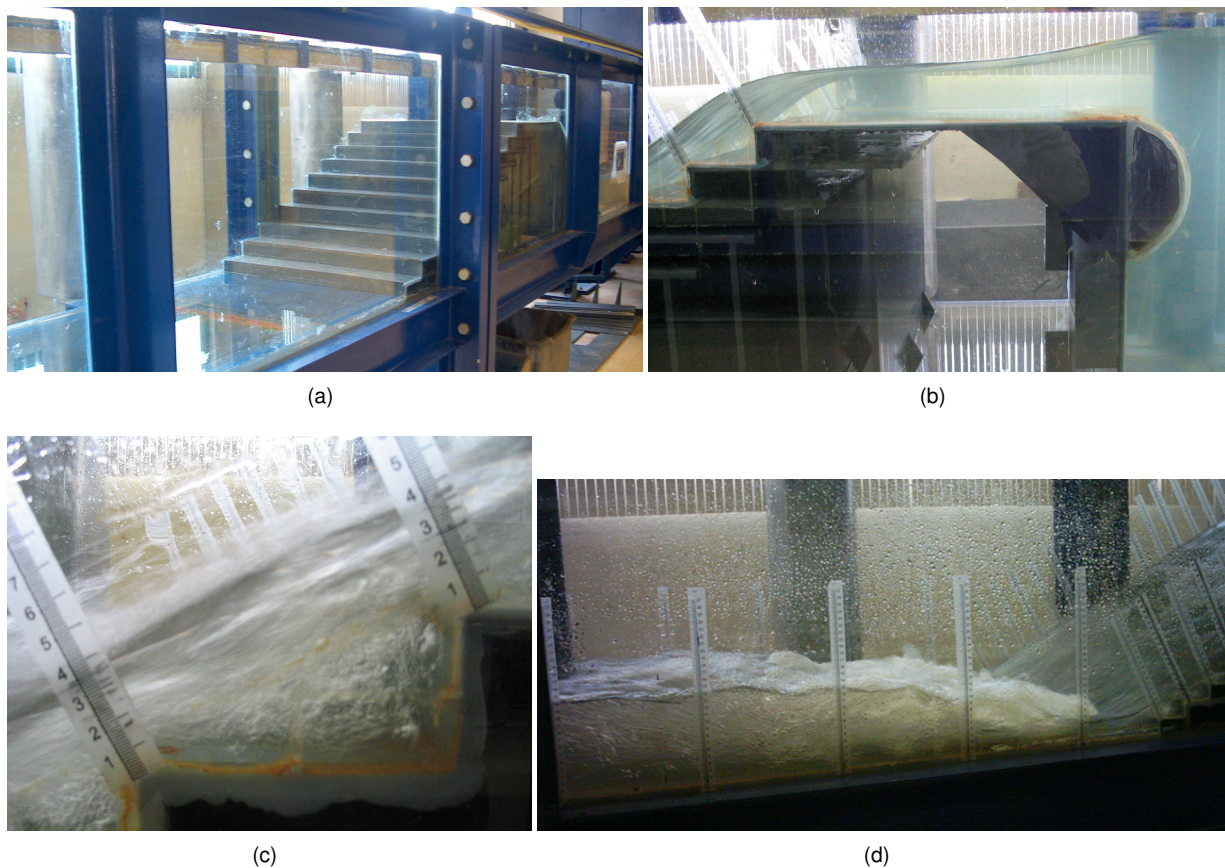


Figura 3.1: Instalação experimental: (a) vista geral; (b) escoamento sobre a soleira descarregadora para $Q=49$ l/s; (c) pormenor da cavidade de um degrau na região arejada do escoamento para $Q=35$ l/s; (d) ressalto hidráulico com início no pé do descarregador (Fot.: André e Ramos, 2003).

Capítulo 4

Modelo Matemático

4.1 Descrição do campo de escoamento

Um fluido é toda a matéria que se deforma indefinidamente quando sujeita a uma tensão tangencial. Para se caracterizar um meio fluido, recorre-se à hipótese de um modelo de meio contínuo, a que corresponde ignorar a estrutura molecular do meio (Brederode, 2014). Esta hipótese é válida quando a menor escala de interesse no problema em questão é muito maior do que as escalas moleculares. Assim, quando o modelo se refere a propriedades num ponto do meio contínuo, está a considerar a média estatística de um grande número de moléculas em torno desse ponto (Gobbi et al., 2015).

O comportamento de um fluido pode ser, então, descrito recorrendo-se aos princípios e equações de conservação da mecânica dos meios contínuos¹:

- **Conservação da massa**
- **Conservação da quantidade de movimento**

A formulação matemática destes princípios constitui a base da dinâmica de fluidos computacional. Antes de se proceder ao estudo destas equações, é necessário introduzir as metodologias de observação utilizadas na descrição do campo do escoamento. Considere-se um elemento infinitesimal de fluido, de volume dV , no seio do escoamento. O estudo desse escoamento pode ser realizado sob duas diferentes perspetivas. A título de exemplo, apresenta-se o conceito de aceleração do escoamento, simultaneamente sob as perspetivas Lagrangeana e Euleriana. Considere-se que o vetor posição é dado por $\vec{X} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$, em que $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ são os vetores segundo os eixos x, y e z . Neste sentido, o vetor velocidade é dado por: $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} = \vec{V}(\vec{X}, t)$, em que t é o tempo.

Considere-se, sob a perspetiva Lagrangeana, a aceleração de um elemento infinitesimal de fluido no seio de um escoamento genérico, que representa a variação da velocidade do elemento de fluido de $\vec{V}(\vec{X}, t)$ para $\vec{V}(\vec{X} + \delta\vec{X}, t + \delta t)$, modificando a posição do elemento de fluido de \vec{X} para $\vec{X} + \delta\vec{x}$ num pequeno intervalo de tempo δt . Assim, a aceleração do elemento de fluido é :

¹As Eqs. que serão apresentadas nos subcapítulos 4.1 e 4.2 foram consultadas em Gobbi et al. (2015), Hirsch (2007), Brederode (2014), Nieckele (2015a).

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{V}(\vec{X} + \delta\vec{X}, t + \delta t) - \vec{V}(\vec{X}, t)}{\delta t} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \frac{D\vec{V}}{Dt} \quad (4.1)$$

onde $\frac{D\vec{V}}{Dt}$ é a derivada total da velocidade, ou aceleração total, $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$ é a derivada local da velocidade, ou aceleração local, e $(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V}$ é a aceleração convectiva. O operador $\frac{D\eta}{Dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \eta$ denomina-se de derivada material de uma propriedade intensiva η .

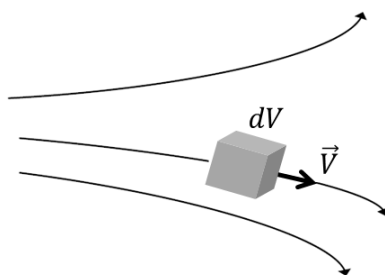


Figura 4.1: Perspetiva Lagrangeana (adaptado de Kositgittwong, 2012).

Na perspetiva Euleriana, a derivada no tempo da velocidade do escoamento num local fixo do escoamento resume-se a $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$.

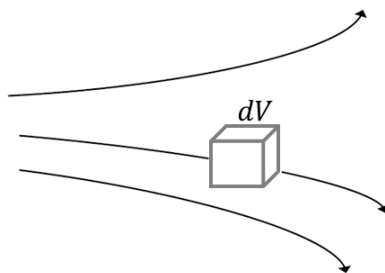


Figura 4.2: Perspetiva Euleriana (adaptado de Kositgittwong, 2012).

4.2 Equações fundamentais da mecânica dos fluidos

4.2.1 Conservação da massa

Considere-se um volume de controlo, definido como o volume de uma porção finita do escoamento. Este volume é definido por um volume de controlo, V_c , e por uma superfície de controlo, S_c , definida como a superfície de fronteira do volume de controlo. O teorema de Transporte de Reynolds define a equação integral de balanço de uma propriedade extensiva N num volume de controlo:

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \eta \rho dV + \int_{S_c} \eta \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS \quad (4.2)$$

O termo $\frac{DN}{Dt}$ representa a variação da propriedade N no sistema. O primeiro termo do segundo membro representa a variação, por unidade de tempo, da quantidade de propriedade contida no volume de controlo, e o segundo membro representa o fluxo dessa propriedade através da superfície de

controlo.

Se a propriedade em estudo for a massa, M , então $N = M$ e $\eta = 1$, pelo que, substituindo na Eq. 4.2, obtém-se:

$$\frac{DM}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho dV + \int_{S_c} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dS \quad (4.3)$$

O princípio da conservação da massa, ou equação da continuidade, enuncia que a massa de um sistema permanece constante, pelo que:

$$\frac{DM}{Dt} = 0 \quad (4.4)$$

Reescrevendo a Eq. 4.3:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho dV + \int_{S_c} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dS \quad (4.5)$$

Uma vez que o volume de controlo não varia no tempo, o operador $\frac{\partial}{\partial t}$ pode-se distribuir dentro do integral, resultando em $\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho dV = \int_{V_c} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$. Na dedução da equação da continuidade também se recorre ao Teorema de Divergência de Gauss, que permite transformar o integral de superfície do segundo membro da Eq. 4.5 em integral de volume: $\int_{S_c} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dS = \int_{V_c} \nabla \cdot (\rho \vec{V}) dV$. Aplicando estas duas transformações à Eq. 4.5, obtém-se:

$$0 = \int_{V_c} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{V_c} \nabla \cdot (\rho \vec{V}) dV \quad (4.6)$$

A Eq. 4.6 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$0 = \int_{V_c} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \right] dV \quad (4.7)$$

Como o volume de controlo V_c é arbitrário, a lei integral da conservação da massa só pode ser satisfeita se o integral for nulo para qualquer ponto do espaço em qualquer instante. Assim:

$$0 = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad (4.8)$$

No caso de um escoamento incompressível, isto é, de $\rho = \text{constante}$, então $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ e a equação da continuidade escreve-se, em notação vetorial:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.9)$$

Ou, em notação indicial:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.10)$$

4.2.2 Conservação da quantidade de movimento

A quantidade de movimento, \vec{P} , é dada por: $\vec{P} = \int_{V_c} \vec{V} \rho dV$. A equação de transporte da quantidade de movimento (2ª Lei de Newton) relaciona a taxa de variação da quantidade de movimento de um fluido com a resultante das forças aplicadas nesse fluido, isto é:

$$\frac{D\vec{P}}{Dt} = \sum \vec{F} = M\vec{a} \quad (4.11)$$

onde F é a resultante das forças aplicadas e \vec{a} a aceleração. De seguida, apenas se vai analisar a componente em x destas equações.

$$\sum F_x = Ma_x = \rho V a_x = \rho(dx dy dz) \frac{Du}{Dt} \quad (4.12)$$

Considerando um elemento infinitesimal de fluido que se move com o escoamento, este está sujeito a uma ação segundo x que resulta da combinação de dois tipos de forças:

- forças de massa: atuam diretamente sobre a massa volúmica do elemento infinitesimal de fluido; segundo a componente x , as quantidades infinitesimais são dadas por: $\rho g_x dx dy dz$, em que g_x representa a força de massa (por exemplo, a gravidade) segundo esta componente;
- forças de superfície: atuam diretamente na superfície do elemento infinitesimal de fluido, sendo estas as forças de pressão e as tensões normais e tangenciais.

Atendendo às direções e sentidos das forças de superfície, a respetiva resultante que atua segundo x é dada por:

$$\left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dy dz + \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dy dz + \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy$$

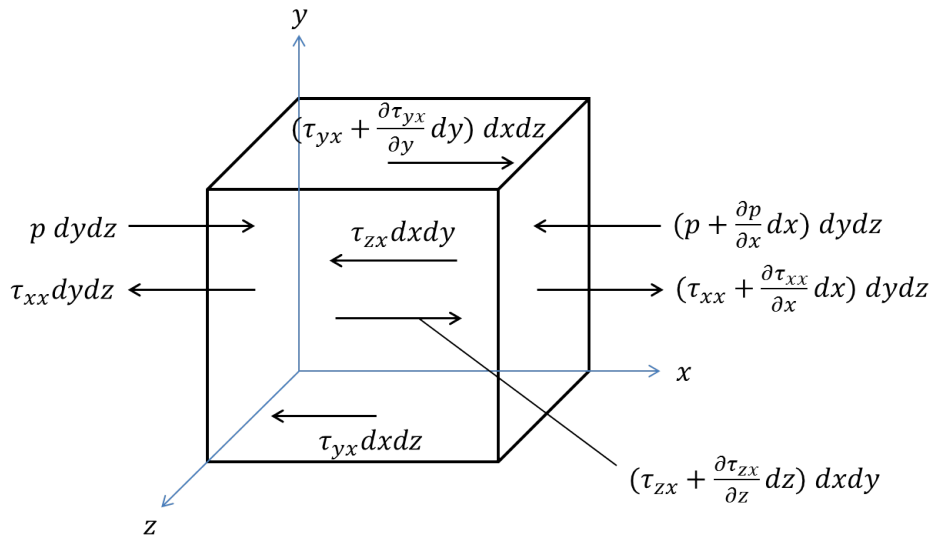


Figura 4.3: Forças de superfície segundo a direção x que atuam no elemento infinitesimal do fluido em movimento.

Então, a força total na componente x resulta da combinação das forças de massa e de superfície, pelo que se obtém a Eq. 4.13:

$$\sum dF_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho g_x dx dy dz \quad (4.13)$$

Substituindo a Eq. 4.13 na Eq. 4.12, obtém-se:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho g_x \quad (4.14)$$

Recorrendo ao conceito de derivada material, é possível escrever o primeiro termo da equação anterior da seguinte forma:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \vec{V} \cdot \nabla u \quad (4.15)$$

O primeiro termo do segundo membro pode ser reescrito:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (4.16)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (4.17)$$

O segundo termo do segundo membro da Eq. 4.15 pode ser reescrito:

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = u \nabla \cdot (\rho \vec{V}) + (\rho \vec{V}) \cdot \nabla u \quad (4.18)$$

$$(\rho \vec{V}) \cdot \nabla u = \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) - u \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad (4.19)$$

Substituindo as Eq.s 4.17 e 4.19 na Eq. 4.15, obtém-se:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) - u \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \right] \quad (4.20)$$

O termo entre parêntesis retos na equação anterior expressa a conservação da massa (ver Eq. 4.8), pelo que o termo é nulo. Deste modo, a equação anterior reduz-se a:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) \quad (4.21)$$

Tendo em conta a equação anterior e a Eq. 4.14, pode-se escrever as componentes segundo x , y e z , como:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho g_x \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g_y \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho g_z \quad (4.24)$$

Um fluido newtoniano é caracterizado pela proporcionalidade entre a tensão tangencial e a taxa de deformação, em que a constante de proporcionalidade é a viscosidade dinâmica, μ . As relações constitutivas, para o caso geral, entre a tensão e a taxa de deformação dos fluidos newtonianos representam-se por:

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (4.25)$$

As tensões viscosas representam uma transferência de quantidade de movimento a nível molecular. Desenvolvendo, obtêm-se ²:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \vec{V}) \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \vec{V}) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \vec{V}) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Substituindo as relações constitutivas 4.26 na Eq. 4.22, obtêm-se as equações gerais de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] \quad (4.27)$$

As equações gerais de Navier-Stokes podem ser simplificadas para escoamentos incompressíveis ($\rho = \text{constante}$), com viscosidade constante ($\mu = \text{constante}$) e tendo em conta que a equação de conservação da massa, para $\rho = \text{constante}$, é $\nabla \cdot \vec{V} = 0$. Obtêm-se então a equação diferencial de transporte de quantidade de movimento de fluidos isotrópicos newtonianos no caso particular de escoamentos a propriedades constantes:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (4.28)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (4.29)$$

² $\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = \nabla \cdot \vec{V}$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (4.30)$$

Em notação indicial:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + g_i \quad (4.31)$$

Em que $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ é a viscosidade cinemática.

O primeiro membro da Eq. 4.31 representa a taxa de variação total da quantidade de movimento por unidade de massa (aceleração) de um elemento de fluido, efeito para o qual contribuem a variação temporal do escoamento como um todo (primeiro termo) e a variação convectiva associada ao transporte do elemento de fluido de um ponto do espaço para outro em que a velocidade seja diferente (segundo termo) Brederode (2014).

O segundo membro da Eq. 4.31 representa as forças aplicadas sobre o elemento de fluido, isto é, as fontes de quantidade de movimento: contribuição invíscida do gradiente de pressão estática (primeiro termo), contribuição viscosa associada ao transporte difusivo da quantidade de movimento (segundo termo) e a contribuição da força da gravidade (último termo) Brederode (2014).

Em notação vetorial, as equações de Navier-Stokes simplificadas assumem a seguinte forma:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (4.32)$$

4.3 Equações adicionais para a modelação de escoamentos turbulentos

4.3.1 Caracterização da turbulência

A maioria dos escoamentos que ocorrem na natureza são turbulentos. De seguida, enumeram-se algumas características da turbulência.

Irregularidade

Uma das características mais evidentes é a irregularidade, ou aleatoriedade, do campo turbulento, em que se observam flutuações turbulentas em torno de um valor médio constante, durante a evolução ao longo do tempo de uma determinada propriedade do escoamento. Esta característica do escoamento turbulento requer que o seu tratamento analítico seja feito através de uma abordagem estatística em vez de determinística (Brederode, 2014).

Difusividade

As flutuações turbulentas da velocidade promovem o transporte de elementos do fluido de umas para outras regiões do escoamento, do que resulta uma elevada capacidade de mistura de massa, quantidade de movimento, energia e contaminantes como calor e partículas (Brederode, 2014, Tennekes et al., 2010, Silva, 2010c).

Números de Reynolds elevados

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que é proporcional ao quociente entre as forças de inércia e as forças viscosas:

$$Re = \frac{F_{inércia}}{F_{viscosa}} = \frac{\rho U \frac{dU}{dx}}{\mu \frac{d^2U}{dy^2}} = \frac{LU}{\nu} \quad \text{com} \quad \mu = \frac{\nu}{\rho} \quad (4.33)$$

em que L é o comprimento característico do escoamento, μ a viscosidade dinâmica, ν a viscosidade cinemática e U a velocidade média do escoamento.

A valores baixos do número de Reynolds correspondem escoamentos em regime laminar, em que o movimento do fluido é essencialmente viscoso e os efeitos de inércia são praticamente desprezáveis. Para valores elevados do número de Reynolds, originam-se instabilidades no escoamento laminar que, sendo amplificadas, originam escoamentos turbulentos (Brederode, 2014, Tennekes et al., 2010).

Tridimensionalidade

Os escoamentos turbulentos têm uma natureza essencialmente tridimensional, em que é possível distinguir a presença de estruturas altamente contorcidas e de diferentes dimensões (diferentes comprimentos de onda) usualmente denominadas por turbilhões (*eddies*) (Brederode, 2014). Um turbilhão

pode ser caracterizado pelo seu tamanho (no domínio físico) ou pelo seu número de onda³, κ , (no domínio espectral). Assim, um determinado tamanho de turbilhão está associado a um determinado número de onda. Um turbilhão de número de onda κ pode ser definido como uma perturbação que contém energia na vizinhança de κ (Tennekes et al., 2010).

Dissipação

Os escoamentos turbulentos são sempre dissipativos (Tennekes et al., 2010). A energia cinética turbulenta (energia cinética associada às flutuações de velocidade) é extraída do escoamento médio pelos turbilhões de maiores dimensões, e vai sendo depois transferida dos maiores para os mais pequenos turbilhões através de um processo de estiramento de vórtices, até ser dissipada pelos efeitos da viscosidade (Sousa, 2012 e Brederode, 2014). Existe, por isso, uma cascata de energia onde esta é transferida dos grandes para os pequenos turbilhões (Silva, 2010b). Por este motivo, a turbulência necessita de um fornecimento contínuo de energia para compensar as perdas viscosas, pois caso contrário, a turbulência decai rapidamente (Tennekes et al., 2010).

Meio contínuo

No estudo da turbulência é utilizado um modelo de meio contínuo, pois as escalas mais pequenas de um escoamento turbulento são muito superiores a qualquer escala de comprimento molecular (Tennekes et al., 2010).

Resumidas as principais características da turbulência, é importante apresentar o espectro de energia que representa a distribuição da energia cinética turbulenta consoante as dimensões dos turbilhões. A Fig. 4.4 apresenta o espectro de energia em função do número de onda, κ .

À gama dos baixos números de onda (grandes comprimentos de onda), correspondem os turbilhões de maior dimensão, que contribuem com a maior percentagem de produção de energia cinética turbulenta, designando-se por isso de turbilhões contendo energia (Brederode, 2014). A dimensão máxima dos grandes turbilhões está limitada pelas condições de fronteira do escoamento (Eça, 2015).

A sub-região inercial é uma zona intermédia, em que se processa a transferência de energia das grandes para as pequenas escalas através do estiramento de vórtices (Bakker, 2002).

Na região dissipativa encontram-se as mais pequenas escalas da turbulência, isto é, os turbilhões responsáveis pela dissipação de energia. Nestas pequenas escalas, os efeitos viscosos fazem-se sentir e dissipam a energia cinética turbulenta em calor (Bakker, 2002). As escalas da região dissipativa designam-se por escalas de Kolmogorov, em que ε representa a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta e definem-se como:

- escala de comprimentos: $\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$
- escala de velocidades: $v_\eta = (\nu\varepsilon)^{1/4}$
- escala de tempos: $\tau_\eta = (\nu/\varepsilon)^{1/2}$

³ $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$

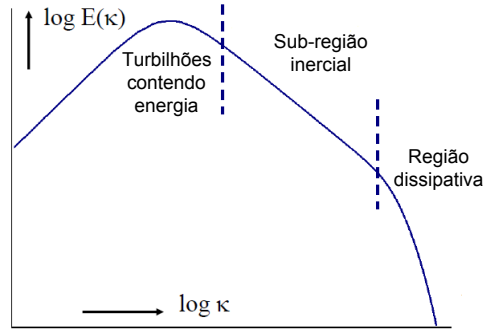


Figura 4.4: Espectro de energia da turbulência em função do número de onda κ (adaptado de Bakker, 2002).

4.3.2 Tipos de simulação computacional

A turbulência é um fenômeno de extrema complexidade devido à grande variedade de escalas de comprimento e de tempos presentes num escoamento turbulento, o que torna a sua simulação numérica um desafio (Versteeg e Malalasekera, 1995). Definem-se três abordagens à simulação computacional de acordo com a capacidade que cada uma tem para resolver numericamente determinadas escalas da turbulência.

A **simulação numérica direta** (*Direct Numerical Simulation*, DNS) resolve numericamente todas as escalas de um escoamento turbulento, pelo que dispensa modelação. Contudo, devido às grandes exigências de resolução espacial e temporal, apenas se deve aplicar esta abordagem em simulações com baixos números de Reynolds (pois o número mínimo de pontos de discretização necessários para uma adequada resolução espacial do escoamento é proporcional ao número de Reynolds) (Pope, 2000, ANSYS, 2009). Simulações DNS exigem grande capacidade de computação, pelo que integram, maioritariamente, a área da investigação, não sendo ainda utilizadas na prática corrente da engenharia.

A **simulação das grandes escalas** (*Large Eddy Simulation*, LES) resolve diretamente as grandes escalas mas modela as pequenas, o que permite reduzir custos computacionais comparativamente ao método DNS (ANSYS, 2009).

As **simulações baseadas nas Equações Médias de Reynolds** (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*, RANS) predominam na prática da engenharia e aplicações industriais pois, nestes casos, o conhecimento do comportamento médio do campo do escoamento é suficiente (pressões médias, velocidades médias, tensões médias), sendo desnecessário o estudo rigoroso das componentes flutuantes do escoamento turbulento. Este tipo de simulações resolve diretamente uma pequena gama das grandes escalas e modela as restantes, pelo que não é computacionalmente exigente quanto as simulações DNS e LES (Hirsch, 2007, Jiyuan et al., 2008).

A Fig. 4.5 apresenta as gamas resolvidas diretamente ou, então, modeladas por cada uma destas simulações.

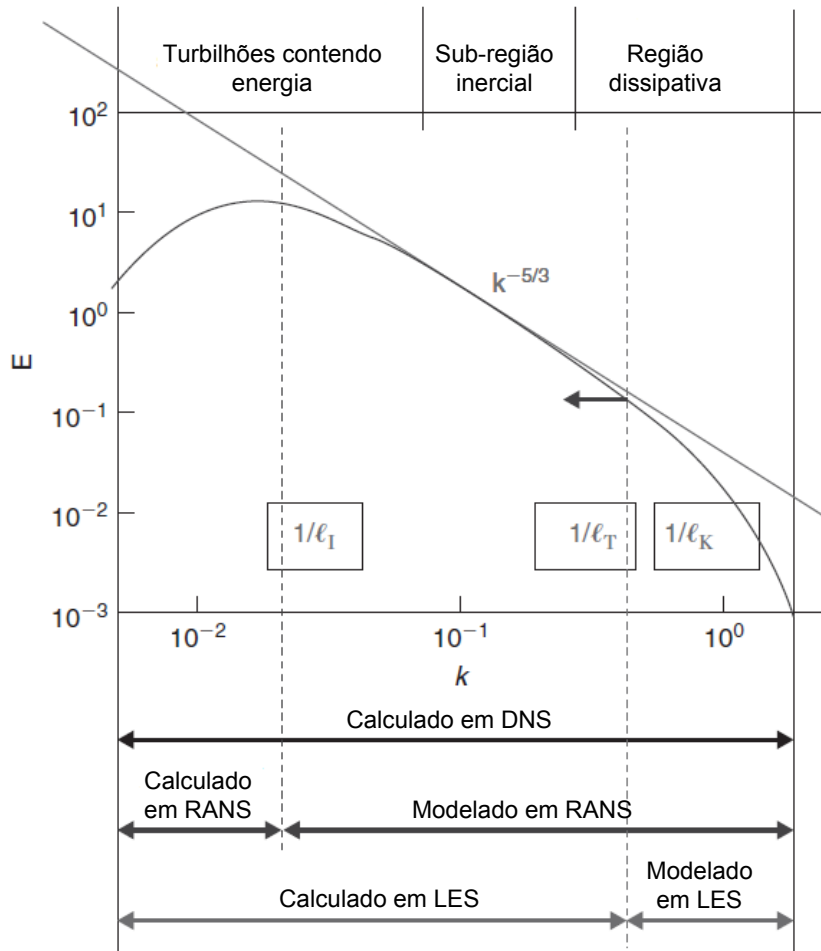


Figura 4.5: Espectro de energia da turbulência em função do número de onda k e com indicação da gama de aplicação das simulações DNS, LES e RANS (adaptado de Hirsch, 2007).

4.3.3 Equações médias de Reynolds

As equações do escoamento para valores instantâneos do movimento turbulento são as equações da continuidade e de Navier-Stokes, apresentadas nas Eqs. 4.34 e 4.35, respetivamente:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + g_i \quad (4.35)$$

Para se obterem as equações para o campo médio das grandezas características do escoamento, é útil aplicar uma decomposição de Reynolds às equações do campo instantâneo, segundo a qual o valor instantâneo de uma variável é obtido pela soma do seu valor médio no tempo (representado por uma barra sobre o símbolo da variável) e da flutuação em torno desse valor médio (representada pelo símbolo da variável seguido de uma aspa), e que se apresenta na Eq. 4.36 (Brederode, 2014):

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (4.36)$$

Aplicando a decomposição de Reynolds às equações do campo instantâneo, obtêm-se as denominadas Equações Médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*), expressas pelas Eqs. 4.37 e 4.38 (Silva, 2010a, ANSYS, 2009 e Pope, 2000) :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + g_i \quad (4.38)$$

Comparando as Eqs 4.35 e 4.38, verifica-se o aparecimento do termo não linear $-\rho \overline{u'_i u'_j}$, denominado de tensor de Reynolds ou tensor das tensões turbulentas, também designado por τ_{ij} . Este termo representa a transferência de quantidade de movimento devido ao campo de velocidades flutuantes (Niecele, 2015b). As componentes da diagonal de τ_{ij} são tensões normais (pressões), que contribuem pouco para o transporte da quantidade de movimento média. Os componentes de fora da diagonal de τ_{ij} são tensões de corte, que desempenham um papel dominante na transferência da quantidade de movimento média por movimento turbulento. O sistema de equações que rege o campo médio do escoamento turbulento torna-se, então, indeterminado, gerando-se o problema de fecho da turbulência.

A hipótese de Boussinesq simplifica este problema, pois propõe uma analogia entre as tensões viscosas a nível molecular (ver Eq. 4.25) e as tensões turbulentas (Pope, 2000, Jiyuan et al., 2008) sendo por isso possível escrever a Eq. 4.39:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4.39)$$

em que o coeficiente de proporcionalidade μ_T é designado de viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*) e k é a energia cinética turbulenta (*turbulent kinetic energy*: $k = \frac{1}{2} (\overline{u'_i})^2$). Com o objectivo de

solucionar o problema de fecho da turbulência, os modelos de turbulência propõem uma equação para a viscosidade turbulenta, μ_t , para que o sistema se torne determinado. Apesar de a hipótese de Boussinesq ser uma simplificação, os modelos de turbulência assentes nesta hipótese exibem desempenhos bastante satisfatórios na simulação de uma grande parte de escoamentos, para além de terem um baixo custo computacional. A validação desta hipótese para vários tipos de escoamento e a comparação dos resultados obtidos através de modelos de turbulência com resultados obtidos por DNS são ainda o objecto de estudo de muitos artigos de investigação (Schmitt, 2007).

4.3.4 Modelos de turbulência

A viscosidade turbulenta é uma característica do campo de escoamento e não do fluido, pelo que variará de ponto para ponto, sendo por isso necessária a determinação da sua lei de variação espacial Brederode (2014). Prandtl, em 1925, propõem que μ_T pode ser estimada através da Eq. 4.40:

$$\mu_T = \rho v_c l_c \quad (4.40)$$

em que v_c e l_c são, respetivamente, as escalas de velocidade e comprimento características do campo turbulento. Os diversos modelos de turbulência que avaliam a viscosidade turbulenta diferem na determinação das anteriores grandezas características.

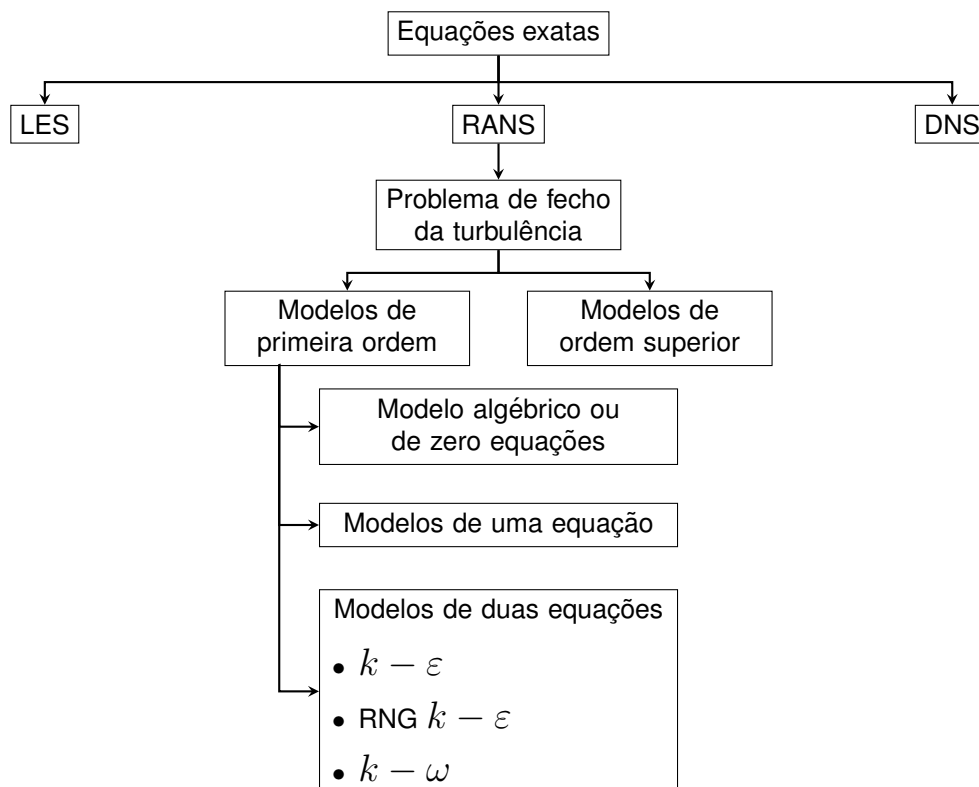


Figura 4.6: Modelos de turbulência (adaptado de Meireles, 2011).

Modelo algébrico ou de zero equações

O modelo algébrico ou de zero equações mais conhecido é o modelo de comprimento de mistura de Prandtl (1925). Este autor sugere que a escala de comprimentos está relacionada com o comprimento de mistura, l_m , que corresponde à distância transversal percorrida por um elemento de fluido até trocar a sua quantidade de movimento com outro. O valor de l_m evolui consoante o desenvolvimento da espessura da camada limite turbulenta, mas a sua especificação correta depende da geometria do escoamento, não sendo, por isso, universal. No entanto, para alguns escoamentos simples, conhecem-se as relações algébricas que estabelecem os valores de l_m (Brederode, 2014 e Niecele, 2015c). A escala de velocidade é dada pela Eq. 4.41, pelo que se obtém, a Eq. 4.42 para a viscosidade turbulenta:

$$v_c = l_m \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \quad (4.41)$$

$$\mu_T = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \quad (4.42)$$

Este modelo, apesar de resolver o problema de fecho de turbulência através de uma simples relação algébrica (Brederode, 2014), não considera o transporte difusivo da turbulência de uma região para a outra do escoamento, pelo que não é adequado quando os transportes difusivo e convectivo da turbulência são importantes (escoamentos com recirculação) (Burnham, 2011a e Niecele, 2015c).

Modelos de uma equação

Os modelos de uma equação foram desenvolvidos com o intuito de obter melhores estimativas do comportamento de escoamentos turbulentos face às anteriormente conseguidas pelos modelos de zero equações, através da adição de uma equação de transporte (equação diferencial parcial) (Celik, 1999). O modelo de uma equação proposto por Prandtl (1945) mantém a escala de comprimentos do modelo anterior, e sugere que a escala de velocidades seja calculada a partir da energia cinética turbulenta, Eq. 4.43, através da solução de uma equação de transporte para k , Eq. 4.44 (CFD Online, 2015):

$$v_c = \sqrt{k} \quad (4.43)$$

$$\rho \left[\underbrace{\frac{\partial k}{\partial t}}_A + \underbrace{\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j}}_B \right] = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}_C + \underbrace{\left[-\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right]}_D - \underbrace{\rho \varepsilon}_E \quad (4.44)$$

A taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, ε , é dada pela Eq. 4.45, e a viscosidade turbulenta pela 4.46:

$$\varepsilon = C_D \frac{k^{3/2}}{l_m} \quad (4.45)$$

$$\mu_T = \rho l_m \sqrt{k} \quad (4.46)$$

Tabela 4.1: Significado dos termos na equação de transporte de k (Meireles, 2011).

A	Taxa de variação de k
B	Transporte de k por convecção
C	Transporte de k por difusão
D	Taxa de produção de k
E	Taxa de destruição de k

Tabela 4.2: Valores das constantes nos modelos propostos por Emmons em 1954 e Glushko em 1965 (CFD Online, 2015, Celik, 1999).

σ_κ	1.0
C_D	0.07 a 0.09

Tabela 4.3: Vantagens e desvantagens do modelo de uma equação (Burnham, 2011a, Celik, 1999).

Vantagens	<p>Baixo custo computacional</p> <p>Mais robusto e rigoroso do que o modelo de comprimento de mistura de Prandtl</p> <p>Inclui os efeitos de transporte por convecção, difusão, e produção de energia cinética turbulenta devido a vários factores</p>
Desvantagens	<p>Requer que o utilizador especifique o comprimento de mistura, sendo muito sensível a esta escolha</p> <p>Não é ideal para escoamentos em torno de geometrias complexas</p>

Modelos de duas equações

Os modelos de duas equações são bastante utilizados na prática da engenharia pois fornecem bons resultados no cálculo de uma grande variedade de escoamentos, nomeadamente em escoamentos com recirculação e com camadas de corte delgadas, sem ser necessário o ajustamento dos valores das constantes para cada caso de estudo (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Estes modelos sugerem que para além da resolução da equação de transporte para k (energia cinética turbulenta), se resolva igualmente uma equação de transporte para a taxa de dissipação, que pode ser a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ε (que constitui o modelo $k - \varepsilon$), ou a taxa de dissipação específica ω (que constitui o modelo $k - \omega$). Os modelos de uma, duas, ou mais equações, são assim denominados consoante o número de equações de transporte utilizadas no cálculo da viscosidade turbulenta.

Modelo $k - \varepsilon$

O modelo de duas equações $k - \varepsilon$ proposto por Launder (1972) sugere, como referido anteriormente, a resolução de duas equações de transporte, uma para k e outra para ε . A escala de velocidades é a mesma que a do modelo de uma equação, expressa na Eq. 4.47 e a escala de comprimentos é expressa pela Eq. 4.48:

$$v_c = \sqrt{k} \quad (4.47)$$

$$l_c = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (4.48)$$

A equação de transporte para a energia cinética turbulenta, k , é dada pela Eq. 4.49 e a equação de transporte para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, ε pela Eq. 4.50:

$$\rho \left[\underbrace{\frac{\partial k}{\partial t}}_A + \underbrace{\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j}}_B \right] = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}_C + \underbrace{-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_D - \underbrace{\rho \varepsilon}_E \quad (4.49)$$

$$\rho \left[\underbrace{\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}}_A + \underbrace{\bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}}_B \right] = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}_C + \underbrace{C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)}_D - \underbrace{\rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}}_E \quad (4.50)$$

Assim, obtém-se a Eq. 4.51 para a viscosidade turbulenta:

$$\mu_T = \rho \nu_c l_c = \rho C_\mu \sqrt{k} \left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \right) = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.51)$$

Os significados dos termos assinalados nas equações anteriores encontram-se na Tabela 4.4 e os valores das constantes, que neste modelo são determinados empiricamente, constam na Tabela 4.5.

Tabela 4.4: Significado dos termos nas equações de transporte de k/ε (Meiros, 2011).

Tabela 4.5: Valores das constantes nas equações de transporte para k e ε (Ferziger e Peric, 1997, Celik, 1999).

A	Taxa de variação de k / ε	$C_{1\varepsilon}$	1.44
B	Transporte de k / ε por convecção	$C_{2\varepsilon}$	1.92
C	Transporte de k / ε por difusão	C_μ	0.09
D	Taxa de produção de k / ε	σ_ε	1.30
E	Taxa de destruição de k / ε	σ_κ	1.0

Tabela 4.6: Vantagens e desvantagens do modelo $k - \varepsilon$ (Burnham, 2011a, Fluent, 2006).

Vantagens	<p>Modelo de turbulência muito utilizado e validado para problemas de engenharia</p> <p>Fornece bons resultados quando aplicado a escoamentos com recirculação e camadas de corte delgadas</p> <p>Modelo de turbulência simples para o qual é necessário apenas definir as condições iniciais e de fronteira</p>
Desvantagens	<p>Apenas válido para escoamentos completamente turbulentos onde os efeitos viscosos moleculares possam ser minimizados, face ao movimento turbulento</p> <p>São desaconselhados no cálculo de escoamentos com elevada taxa de deformação, separação da camada limite, linhas de corrente curvas e superfícies curvas</p> <p>Computacionalmente mais exigente que os modelos de comprimento de mistura de Prandtl e uma equação</p>

Modelo RNG $k - \varepsilon$

O modelo de duas equações RNG $k - \varepsilon$ desenvolvido por Yakhot et al. (1992) consiste num refinamento do modelo $k - \varepsilon$, pois aplica uma rigorosa técnica de análise estatística denominada *Re-Normalization Group* para a derivação das equações médias das grandezas características da turbulência, tais como a energia cinética turbulenta e a sua taxa de dissipação (Burnham, 2011a, Fluent, 2006). Os dois modelos apresentam equações semelhantes. No entanto, as constantes que figuram nas equações do modelo RNG $k - \varepsilon$ são derivadas explicitamente, enquanto que no modelo $k - \varepsilon$ são obtidas empiricamente (Flow Science, Inc., 2014). Para além disso, o modelo RNG $k - \varepsilon$ apresenta um termo adicional na equação de transporte para ε . Estas alterações permitem que o modelo seja aplicável a uma maior gama de escoamentos e que considere o efeito de diferentes escalas de movimento para a difusão da turbulência.

A equação de transporte para a energia cinética turbulenta, k , apresenta-se na Eq. 4.52, e a equação de transporte para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, ε , apresenta-se na Eq. 4.53:

$$\rho \left[\underbrace{\frac{\partial k}{\partial t}}_A + \underbrace{\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j}}_B \right] = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}_C + \underbrace{-\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_D - \underbrace{\rho \varepsilon}_E \quad (4.52)$$

$$\rho \left[\underbrace{\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}}_A + \underbrace{\bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}}_B \right] = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}_C + \underbrace{C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(-\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)}_D - \underbrace{\rho C_{2\varepsilon}^* \frac{\varepsilon^2}{k}}_E \quad (4.53)$$

em que o termo $C_{2\varepsilon}^*$ é obtido através de uma função que depende do tensor das tensões, de k , ε e do valor de $C_{2\varepsilon}$.

Tabela 4.7: Significado dos termos nas equações de transporte de k/ε (adaptado de Meireles, 2011).

A	Taxa de variação de k / ε
B	Transporte de k / ε por convecção
C	Transporte de k / ε por difusão
D	Taxa de produção de k / ε
E	Taxa de destruição de k / ε

Tabela 4.8: Valores das constantes nas equações de transporte para k e ε (Ferziger e Peric, 1997).

$C_{1\varepsilon}$	1.42
$C_{2\varepsilon}^*$	Função do tensor das tensões, k e ε
C_μ	0.0845
σ_ε	0.7194
σ_κ	0.7194

Tabela 4.9: Vantagens e desvantagens do modelo RNG $k - \varepsilon$ (Burnham, 2011a, Flow Science, Inc., 2014).

Vantagens	Mais preciso e fiável para uma maior gama de escoamentos do que o modelo $k - \varepsilon$ Tem em conta os efeitos das escalas mais pequenas para a difusão da turbulência Mais sensível aos efeitos de variações repentinas de tensão e linhas de corrente curvas Melhor descrição de escoamentos com intensas regiões de corte do que o modelo $k - \varepsilon$
Desvantagens	Não ideal em escoamentos fortemente turbilhonares

Modelo $k - \omega$

O modelo de duas equações $k - \omega$ desenvolvido por Wilcox (1993) apresenta uma equação para a energia cinética turbulenta, k , e outra para a taxa de dissipação específica, ω .

A equação de transporte para a energia cinética turbulenta, k , é dada pela Eq. 4.54 e a equação de transporte para a taxa de dissipação específica, ω , é dada pela Eq. 4.55:

$$\rho \underbrace{\left[\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}_{\text{A}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}_{\text{C}} + \underbrace{-\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_{\text{D}} - \underbrace{\beta^* \rho k \omega}_{\text{E}} \quad (4.54)$$

$$\rho \underbrace{\left[\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]}_{\text{A}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]}_{\text{C}} + \underbrace{\alpha \frac{\omega}{k} \left(-\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)}_{\text{D}} - \underbrace{\beta \rho \omega^2}_{\text{E}} \quad (4.55)$$

Tabela 4.10: Significado dos termos nas equações de transporte de k/ω (Meireles, 2011).

A	Taxa de variação de k / ω
B	Transporte de k / ω por convecção
C	Transporte de k / ω por difusão
D	Taxa de produção de k / ω
E	Taxa de destruição de k / ω

Tabela 4.11: Valores das constantes nas equações de transporte para k e ω (Ferziger e Peric, 1997).

α	13/25
β	^a
β^*	^b
σ_ω	1/2
σ_κ	1/2

^aCoeficientes dados por funções que não serão apresentadas neste documento

^bCoeficientes dados por funções que não serão apresentadas neste documento

Tabela 4.12: Vantagens e desvantagens do modelo $k - \omega$ (Flow Science, Inc., 2014, Frei, 2013).

Vantagens	Em determinadas condições, pode ser superior aos modelos $k - \varepsilon$ e RNG $k - \varepsilon$, em particular junto de paredes sólidas e em escoamentos com gradientes de pressão na direção do escoamento, tais como jatos e esteiras.
Desvantagens	Apresenta mais dificuldade a convergir do que o modelo $k - \varepsilon$ e é mais sensível às condições iniciais

Capítulo 5

Modelo Numérico

5.1 Caracterização geral da dinâmica de fluidos computacional

A dinâmica de fluidos computacional, CFD (em inglês, acrónimo para *Computational Fluid Dynamics*), permite a simulação de problemas relacionados com o escoamento de fluidos e envolve, essencialmente, três áreas de estudo: a dinâmica/mecânica dos fluidos, a matemática e a ciência da computação. No início, esta tecnologia era apenas conhecida nas áreas das engenharias aeronáutica e aeroespacial, mas o recente avanço na capacidade de processamento dos computadores permitiu que os *softwares* de CFD tenham, hoje em dia, muitas aplicações, tanto na prática da engenharia (mecânica, civil, biomédica, química, ambiental), como na indústria (automóvel, metalúrgica) e no meio académico (investigação), entre outras. Os *softwares* de CFD representam um complemento aos estudos experimentais e analíticos relativos a um determinado problema, permitindo uma substancial redução do tempo e custo investidos no *design* de novos sistemas de escoamento de fluidos. Estes *softwares* possuem a capacidade de simular escoamentos de fluidos em determinadas condições que não são passíveis de serem reproduzidas e estudadas experimentalmente, tais como sistemas demasiado grandes ou remotos e cenários de catástrofe (acidentes nucleares, tsunamis, etc).

Como analisado no capítulo anterior, o escoamento de fluidos é descrito através de equações às derivadas parciais, que não podem ser resolvidas analiticamente (exceto em casos especiais). Como tal, a base de todos os *softwares* de CFD consiste na transformação das equações do modelo matemático em sistemas de equações algébricas para as variáveis do problema, que serão obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo e resolvidas através de métodos numéricos (Ferziger e Peric, 1997).

Os *softwares* comerciais de CFD incluem interfaces gráficas *user-friendly* (GUI-*Graphical User Interface*) para que os utilizadores possam fazer o *input* dos parâmetros de simulação e a análise dos respetivos resultados de um modo simples e acessível, mesmo quando estão a trabalhar com problemas de dinâmica dos fluidos muito complexos (Versteeg e Malalasekera, 1995 e Jiyuan et al., 2008).

Os *softwares* comerciais de CFD são compostos por três elementos que se apresentam de seguida.

Pré-processador

O pré-processador consiste numa interface na qual o utilizador insere os parâmetros necessários à simulação, sendo esta informação posteriormente convertida de modo a ser reconhecida e resolvida pelo *Solver*. A fase de pré-processamento envolve:

- definição da geometria da região de interesse: o domínio computacional;
- geração da malha (discretização espacial): sub-divisão do domínio em células (ou volumes de controlo). Reveste-se de grande importância, uma vez que a precisão dos resultados computacionais depende do tipo de malha, do número de células (tamanho da malha) e da adequabilidade da malha à geometria (Hirsch, 2007);
- seleção dos fenómenos físicos e químicos que interferem na simulação computacional;
- definição das propriedades dos fluidos;
- definição das condições de fronteira.

Solver

No *Solver* decorre o processo de obtenção da solução computacional, que se desenvolve em diferentes fases.

A primeira fase envolve a discretização das equações fundamentais de mecânica dos fluidos. Os métodos de discretização são métodos de aproximar as equações diferenciais às derivadas parciais a sistemas de equações algébricas para as variáveis do problema, que serão posteriormente obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo. Os métodos de discretização mais utilizados em CFD são o Método dos Elementos Finitos, o Método das Diferenças Finitas e Método dos Volumes Finitos. O Método dos Volumes Finitos será apresentado com mais detalhe no subcapítulo 5.2.5, uma vez que é o método de discretização do FLOW-3D®. Do processo de discretização das equações sobre a malha anteriormente gerada, resulta um conjunto de equações algébricas denominado de **esquema numérico** (*numerical scheme*).

A segunda fase envolve a resolução do sistema de equações algébricas obtidas na fase anterior, através de métodos numéricos que podem ser diretos ou iterativos. Da aplicação destes métodos ao esquema numérico resulta a **solução numérica** (*numerical solution*), ou solução computacional.

Uma solução numérica pode conter muitos erros, que vão sendo gerados durante as fases anteriormente descritas. Estes erros têm de ser monitorizados, e por isso os algoritmos numéricos incluem vários métodos de análise de consistência, estabilidade e convergência, conceitos que se definem de seguida.

Em primeiro lugar, é necessário que a formulação do sistema de equações algébricas resultantes do processo de discretização (esquema numérico) seja consistente com as equações diferenciais originais (Jiyuan et al., 2008). Para garantir consistência, o esquema numérico deve tender para as equações diferenciais à medida que os passos de tempo e espaço de cálculo (*time and space step*) tendem para zero (Hirsch, 2007).

Os métodos de análise de estabilidade (como o método de Von Neumann) avaliam os erros entre a solução numérica e a solução exata do esquema numérico, incluindo também nesta avaliação os erros de arredondamento (devido à precisão finita dos computadores). Se os erros não aumentam durante a simulação e permanecerem limitados por um certo valor, a solução numérica diz-se estável (Jiyuan et al., 2008 e Hirsch, 2007).

A consistência e a estabilidade são condições necessárias mas não suficientes para atingir a convergência (Versteeg e Malalasekera, 1995). Uma solução numérica converge quando tende para a solução exata das equações diferenciais do modelo matemático. A convergência pode ser analisada através da progressiva contabilização dos desequilíbrios associados ao decorrer do processo iterativo. Estes desequilíbrios são conhecidos como resíduos e são uma medida de convergência da solução computacional. A solução atinge a convergência quando os resíduos são menores do que o critério de convergência previamente selecionado nos parâmetros de controlo de convergência dos métodos iterativos. Estes resíduos podem ser monitorizados no decorrer da simulação através da interface gráfica (GUI) dos *softwares* comerciais (Jiyuan et al., 2008)

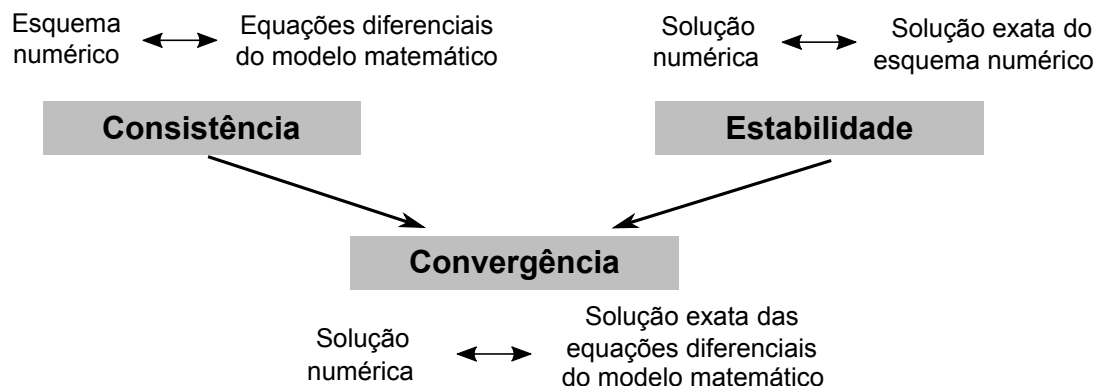


Figura 5.1: Relações entre os conceitos de consistência, estabilidade e convergência (adaptado de Hirsch, 2007).

Pós-processador

Os *softwares* comerciais incorporam poderosas ferramentas de visualização gráfica dos resultados, que possibilitam a obtenção de (Versteeg e Malalasekera, 1995):

- Gráficos 2D e 3D
- Gráficos com representação de vetores
- Representação de linhas de corrente
- Gráficos de isolinhas (*line and shaded contour plots*)
- Animações

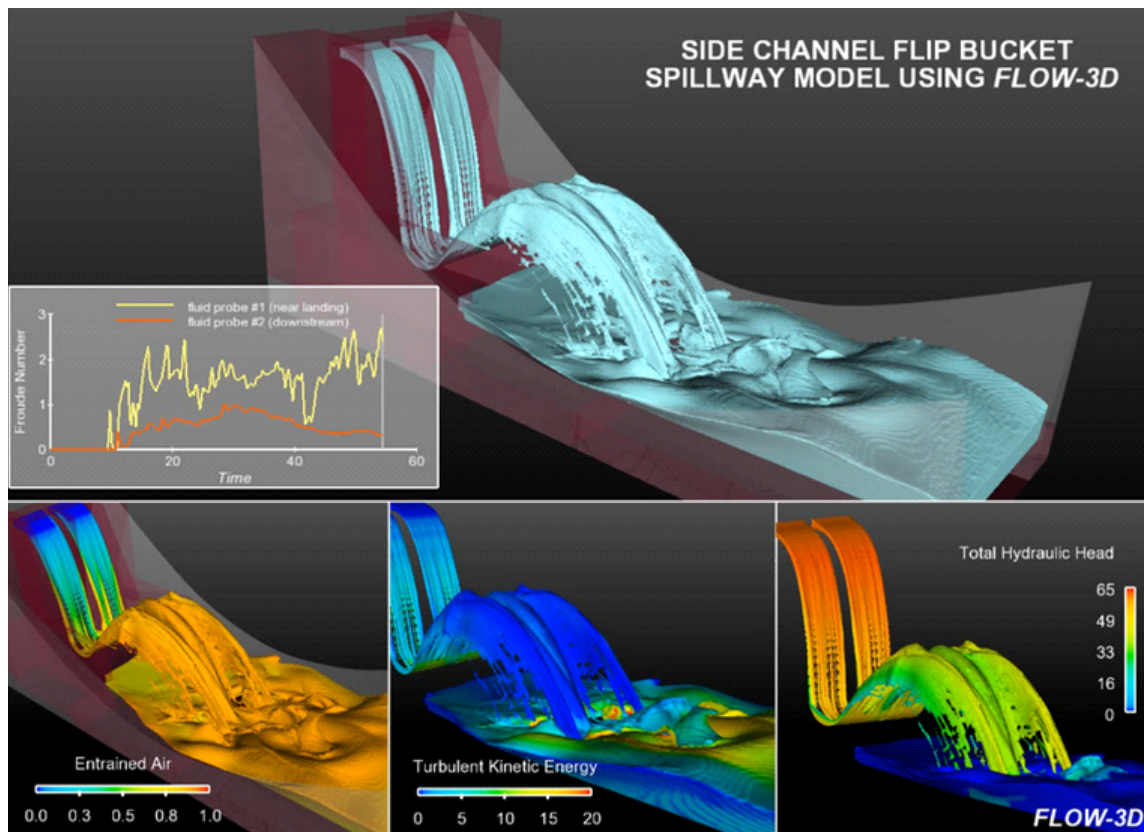


Figura 5.2: Exemplos de gráficos obtidos através do pós-processador do código comercial FLOW-3D® (Flow Science, Inc., 2015).

Apesar de todas as vantagens associadas à utilização destes *softwares*, um utilizador conhecedor da complexidade inerente ao escoamento de fluidos está consciente das suas limitações. Os resultados obtidos computacionalmente devem ser devidamente avaliados pelo utilizador antes de serem aceites como credíveis, o que requer um olhar crítico sobre os mesmos. Uma forma de estimar os erros introduzidos pela escolha de uma malha inadequada, é proceder a um estudo de independência de malha (*grid-independence study*): o utilizador deve começar por realizar simulações em malhas grosseiras e depois refinar, sucessivamente, a malha, até as soluções já não apresentarem diferenças significativas entre si. Nesta situação, obtém-se uma solução independente da malha (*grid-independent solution*). Esta técnica assume que as sucessivas soluções correspondentes a malhas mais refinadas convergem para a solução exata. A procura sistemática por resultados independentes da malha utilizada é um procedimento essencial para a obtenção de resultados de alta qualidade (Versteeg e Malalasekera, 1995). Uma das mais importantes práticas para a avaliação do rigor de uma simulação computacional é a validação dos resultados numéricos, isto é, a sua comparação com resultados obtidos experimentalmente para as mesmas condições de escoamento. Desta forma, garante-se que os resultados computacionais representam uma aproximação válida da realidade que se pretende simular.

5.2 Introdução ao *software* comercial FLOW-3D®

O *software* comercial FLOW-3D® é um programa de dinâmica de fluidos computacional, desenvolvido pela FlowScience, Inc., e que se distingue de outros *softwares* comerciais pela sua capacidade especial de modelar, com grande precisão, escoamentos em superfície livre. Esta e outras características serão apresentadas de seguida.

5.2.1 Malha

O FLOW-3D® utiliza uma malha estruturada e retangular, que pode ser definida num sistema de coordenadas cartesianas ou cilíndricas. A malha é desfasada (*staggered grid*), o que significa que as quantidades escalares, tais como a temperatura e pressão são calculadas no centro das células, enquanto que as quantidades vectoriais, tais como as velocidades, são calculadas nas faces das células.

Num sistema de coordenadas cartesianas, a malha pode ser uniforme, se o espaçamento da malha em cada direção for constante, ou não uniforme, se o espaçamento não se mantiver constante (ver Fig. 5.3) (Flow Science, Inc., 2014).

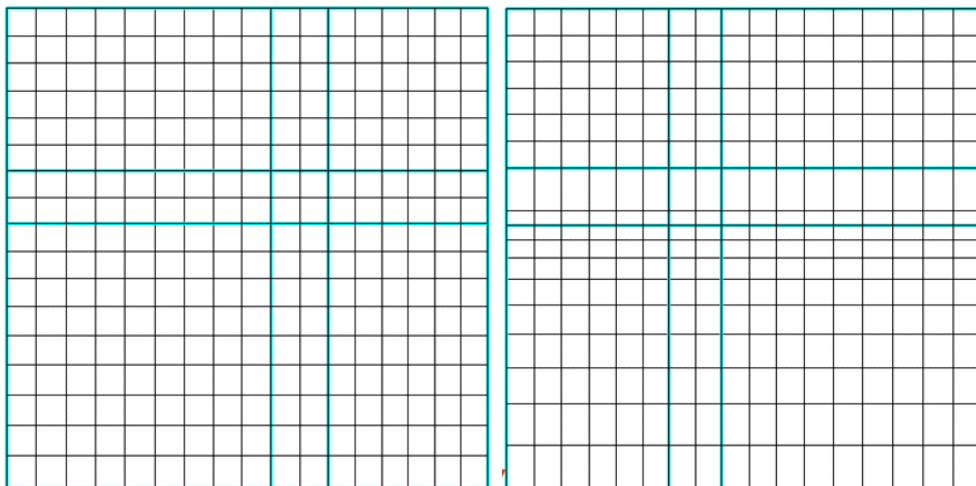


Figura 5.3: À esquerda, exemplo de uma malha uniforme; à direita, exemplo de uma malha não uniforme (Burnham, 2011a).

A utilização de uma malha não uniforme pode ser favorável em determinadas situações, pois adiciona alguma flexibilidade quando se simulam escoamentos complexos. Contudo, se a malha estiver já muito longe da uniformidade, a simulação irá exibir reduzida estabilidade e, conseqüentemente, longos tempos de simulação e qualidade questionável. A solução ideal será a construção de uma malha uniforme sempre que possível (Hirsch, 2007). Para se obterem resultados rigorosos, é aconselhável que a proporção entre lados de uma mesma célula ($x:y$, $y:z$ e $x:z$) seja igual a 1, ou que não exceda 3.0 entre duas direções: no FLOW-3D®, esta proporção designa-se *maximum aspect ratio*. Entre células adjacentes, a proporção na mesma direção ($x:x$, $y:y$ ou $z:z$) deve aproximar-se, o mais possível, à unidade, e no máximo não deve exceder 1.25: no FLOW-3D®, esta proporção designa-se *maximum adjacent cell size ratio* (Flow Science, Inc., 2014 e Burnham, 2011a).

No FLOW-3D[®], é possível definir múltiplos blocos de malha, o que permite adicionar blocos de malha mais refinada e aumentar a resolução da simulação apenas em determinadas áreas de interesse. Se um desses blocos de malha adicionais estiver totalmente inserido dentro de outro (incluindo o caso em que as suas fronteiras estão alinhadas com as do bloco onde está inserido), então designa-se de *nested block*. Se, por outro lado, os blocos apenas partilharem uma fronteira, o bloco adicional designa-se de *linked block*. Os blocos também podem sobrepor-se parcialmente (*partially-overlapping block*).

Sempre que se adicionam múltiplos blocos ao domínio computacional, aumentam as possibilidades de existirem erros de interpolação entre estes, pelo que não se devem definir demasiados blocos, apenas os necessários. Durante a construção de uma malha com múltiplos blocos, devem respeitar-se algumas boas práticas para se evitarem os erros anteriormente referidos, tais como:

- minimizar o número de blocos, pois cada bloco introduz novas fronteiras que requerem interpolações e que são possíveis fontes de erros;
- evitar grandes diferenças entre tamanhos de células adjacentes: um rácio de 2:1 é considerado o mais adequado (*cell size ratio*);
- evitar colocar as fronteiras entre blocos em regiões onde são esperados elevados gradientes no escoamento ou em áreas com significativas variações de geometria;
- assegurar o maior alinhamento possível entre células de diferentes blocos (ver Fig. 5.4).

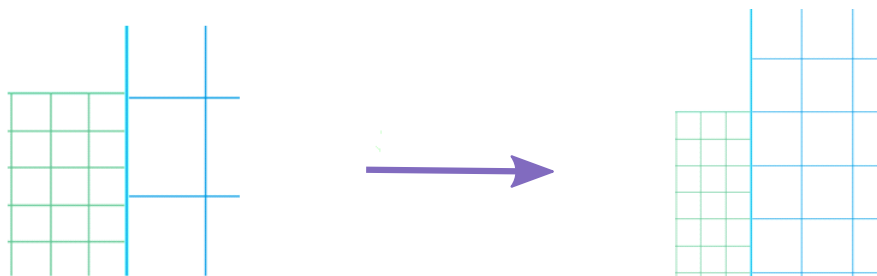


Figura 5.4: À esquerda: alinhamento entre células a evitar; à direita: alinhamento aconselhado (adaptado de Burnham, 2011a).

5.2.2 Geometria

A geometria pode ser importada para o FLOW-3D[®] a partir de ficheiros com o formato *.stl* (*Stereolithography file*), produzidos por um *software* CAD. É também possível definir a geometria (desde que esta seja simples) a partir da interface gráfica, que disponibiliza variadas formas geométricas, tais como esferas, cilindros, cones e paralelepípedos. No caso de geometrias muito complexas, a escolha óbvia recai na importação da geometria através de um ficheiro *.stl*. Para importar topografia, utilizam-se ficheiros ASCII, sendo que o FLOW-3D[®] providencia meios para a avaliação da qualidade destes ficheiros após serem importados.

5.2.3 Método VOF

Define-se superfície livre como a interface entre um líquido e um gás, em que o gás apenas pode aplicar pressão sobre o líquido (é o caso da água e ar). No FLOW-3D[®], as superfícies livres são localizadas através do método VOF (*Volume Of Fluid*), desenvolvido por Hirt e Nichols (1981) e que é constituído por 3 elementos. O primeiro consiste na determinação de uma função de volume de fluido (VOF *function*), $F(x,y,z,t)$, que contabiliza a quantidade de fluido em cada célula. A interpretação de F , isto é, da fração de fluido (*fluid fraction*), depende do tipo de problema que se pretende simular. O problema pode ser entendido como o escoamento de um fluido (*one-fluid problem*) ou o escoamento de dois fluidos (*two-fluid problem*). Para o primeiro caso (mais usual), a fração de fluido é igual a 1 nas células em que existe fluido; as regiões de vazio (*void*) correspondem a valores de fração de fluido igual a 0. Define-se vazio como uma região sem fluido e com uma pressão uniforme associada. Fisicamente, representam regiões preenchidas por um gás (ar) cuja densidade é insignificante quando comparada com a densidade do fluido que se está a escoar. É nas células com valor de F entre 0 e 1 que se encontra a superfície livre (ver Fig. 5.5) (Flow Science, Inc., 2015 e Burnham, 2011a).

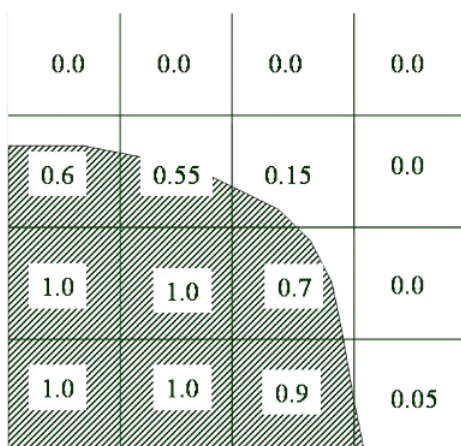


Figura 5.5: Valores típicos para F perto de uma superfície livre (Hirt e Nichols, 1981).

O segundo elemento do método VOF consiste na utilização de um algoritmo de advecção para a equação de transporte da função F e o terceiro elemento é a aplicação de adequadas condições de fronteira à superfície livre (Flow Science, Inc., 2014 e Meireles, 2011).

O FLOW-3D[®] aperfeiçoou o método VOF original, incorporando neste a capacidade de determinar com maior rigor a orientação do fluido nas células de superfície e consequentemente melhorar a simulação da sua advecção para células vizinhas. Esta técnica melhorada designa-se de TruVOF[™] (Burnham, 2011a). O FLOW-3D[®] disponibiliza várias opções para o cálculo da advecção (*VOF advection options*). É aconselhada a utilização da opção em *default*, isto é, a opção por omissão, uma vez que funciona bem para a maioria dos casos. Esta opção é a automática, o que significa que é o programa que seleciona automaticamente qual o melhor método consoante o tipo de interface e o número de fluidos de cada simulação (Flow Science, Inc., 2014).

5.2.4 Método FAVOR™

As malhas estruturadas e retangulares são as que mais 'naturalmente' reproduzem o escoamento em superfície livre, uma vez que as linhas horizontais da malha se parecem alinhar, pelo menos conceitualmente, com as linhas de corrente do escoamento (Hirsch, 2007 e Burnham, 2011a). No entanto, este tipo de malha não resolve com rigor as superfícies curvas, e por isso, na presença destas superfícies, é usual optar-se por construir um outro tipo de malha: curvilínea e que se ajusta às superfícies (*body-fitted grid*). A maior desvantagem deste último tipo de malha é que a sua construção é muito complexa, requer tempo, e obriga a que o utilizador modifique a malha sempre que decidir alterar a geometria (Hirsch, 2007).

Por estes motivos, Hirt e Sicilian (1985) desenvolveram uma técnica denominada de FAVOR™ (acrónimo para *Fractional Area-Volume Obstacle Representation*) que tem a capacidade de incorporar qualquer tipo de geometria numa malha estruturada e retangular. Esta técnica possibilita definições da malha e geometria completamente independentes (*free gridding*), pelo que alterações na geometria não implicam uma modificação da malha, e vice-versa. Assim, o FLOW-3D® utiliza a malha de elementos retangulares sem perda de rigor, malha esta que tem a vantagem de ser regular (o que facilita os cálculos numéricos), muito fácil de gerar, e que requer muito pouca capacidade de memória.

Este complexo algoritmo, executado durante o pré-processamento da simulação, calcula, para cada célula, as frações de área aberta ao escoamento nas faces (A_i), a fração de volume aberto ao escoamento (V_F) e reconstrói a geometria baseado-se nestes parâmetros. A_i representa o quociente entre a área da face aberta ao escoamento, isto é, sem obstáculos, e a área total da face da célula. V_F representa o quociente entre o volume aberto ao escoamento sobre o volume total da célula. O algoritmo armazena apenas 3 frações de área e uma fração de volume por célula, o que constitui pouca (mas suficiente) informação quando comparada com a informação armazenada em malhas do tipo *body-fitted* (Flow Science, Inc., 2014). A interface de um obstáculo numa célula é definida por uma linha reta (se a 2 dimensões), ou por um plano (se a 3 dimensões), determinados pelos pontos onde o obstáculo intersecciona a face da célula (Savage e Johnson, 2001).

Esta abordagem tem implicações e algumas delas estão ilustradas na Fig. 5.6 e são explicadas de seguida. Na imagem à esquerda observa-se a geometria original, e na imagem à direita a geometria processada pelo método FAVOR™.

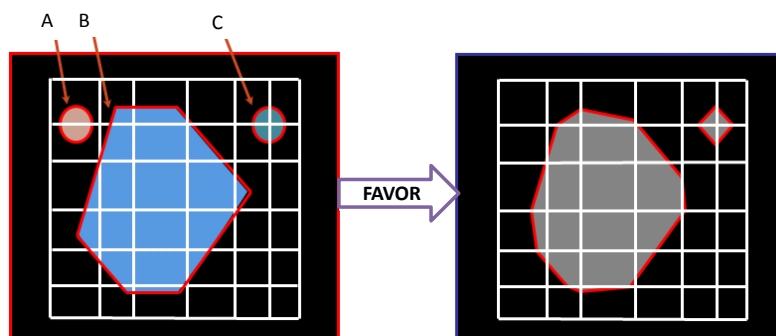


Figura 5.6: Casos A, B e C: consequências da aplicação do método FAVOR™ (adaptado de Burnham, 2011a).

1. Qualquer obstáculo deve, pelo menos, ocupar uma interseção de linhas de malha (ou seja, um canto/vértice de uma célula), para que seja possível gerar uma fração de área para calcular: componentes que não ocupem pelo menos um canto de uma célula, serão apagados do domínio (caso A).
2. Os pontos angulosos da geometria que se situem dentro das células e não sobre uma linha da malha não serão considerados (caso B).
3. Um círculo que ocupe uma interseção não irá desaparecer do domínio; no entanto, as suas curvas transformam-se em linhas retas (caso C).

O FAVOR™ elimina, assim, o efeito de 'degrau' associado à representação de superfícies curvas em malhas retangulares e substitui todas as fronteiras/interfaces da geometria (ou seja, dos obstáculos) por segmentos de linha reta. Esta simplificação de uma linha curva por uma linha reta introduz um pequeno erro que é minimizado com o refinamento da malha (Savage e Johnson, 2001 e Flow Science, Inc., 2014).

A resolução da geometria incorporada na malha pelo método FAVOR™ pode ser visualizada na interface gráfica (através do ícone *FAVORize*), e deste modo o utilizador consegue avaliar a qualidade da resolução, aperceber-se dos objetos que podem não ter sido considerados e de outras simplificações executadas pelo algoritmo.

O FAVOR™ permite a incorporação dos efeitos da geometria nas equações fundamentais da mecânica dos fluidos. Deste modo, a Equação da Continuidade e as Equações de Navier-Stokes presentes no FLOW-3D® diferem das anteriormente apresentadas em 4.10 e 4.31, pois são formuladas tendo em conta as frações de área e volume calculadas. As equações reformuladas e simplificadas para fluidos incompressíveis e coordenadas cartesianas podem ser expressas pela Eq. 5.1 (Equação da continuidade) e Eqs. 5.2 a 5.4 (Equações de Navier-Stokes):

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} u \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} v \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} w \quad (5.4)$$

Nestas equações, A_x , A_y e A_z são as frações de área nas direções x , y e z ; V_F é a fração de volume; R_{SOR} é uma fonte de massa (para casos em que tal exista); G_i são acelerações (gravidade e referencial não-inercial); f_i são acelerações viscosas; b_i representa perdas de fluido devido à porosidade.

Relembrando o arranjo de malha desfasada (*staggered grid*) utilizado por este software, apresenta-se a Fig. 5.7, onde se observa que as frações de volume (V_F) são armazenadas no centróide de cada volume de controlo (a par das pressões, fração de fluido, quantidades turbulentas, densidade, viscosidade) e as frações de área (A_i) são armazenadas no centroide das faces das células (a par das velocidades).

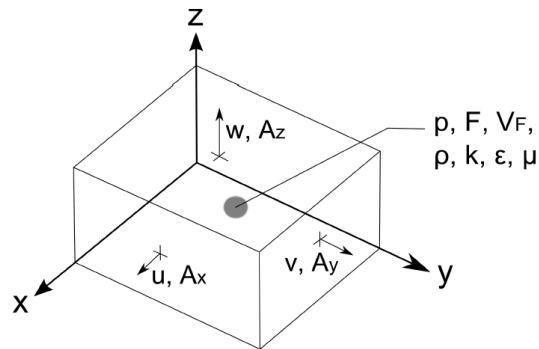


Figura 5.7: Localização das variáveis numa célula de malha desfasada (*staggered grid*) (Vanneste, 2012).

5.2.5 Método dos volumes finitos

O FLOW-3D[®] utiliza o método dos volumes finitos para a discretização das equações fundamentais da dinâmica de fluidos. Este método discretiza a forma integral das equações num volume de controlo, o que constitui uma grande vantagem deste método, pois garante-se a conservação das quantidades fundamentais do escoamento (massa, quantidade de movimento, energia) após a discretização. Cada célula da malha gerada representa o volume de controlo no qual se integram as equações. Em geral, as integrações de divergências são simplificadas em fluxos de superfície, pelo que é necessário determinar certas quantidades por esquemas de interpolação através dos valores armazenados nos centróides de cada volume de controlo. A conversão das equações na forma integral em equações algébricas (esquema numérico) também envolve aproximações de diferenças finitas. Por oposição ao método dos volumes finitos, o método das diferenças finitas discretiza a forma diferencial das equações, considerando pontos em vez de células. (Hirsch, 2007, Versteeg e Malalasekera, 1995, Jiyuan et al., 2008).

5.2.6 Modelos de turbulência

No FLOW-3D[®], as equações que regem os modelos de turbulência diferem ligeiramente das anteriormente apresentadas no capítulo 4.3.4., uma vez que também incluem a influência do método FAVOR[™] e generalizam a produção e dissipação de energia turbulenta associada às forças de flutuabilidade (*buoyancy forces*) (Flow Science, Inc., 2014). Apresenta-se de seguida a formulação do modelo RNG $k - \varepsilon$, uma vez que será o modelo utilizado nas simulações presentes no capítulo seguinte. Nas Eqs. 5.5 e 5.6, figuram as equações de transporte para a energia cinética turbulenta, k , e de transporte para a dissipação da energia turbulenta, ε :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial k}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k}{\partial z} \right] = P_T + G_T + \text{Diff}_{k_T} - \varepsilon_T \quad (5.5)$$

O termo P_T representa a produção de energia cinética turbulenta, G_T a produção (ou decaimento) de energia cinética turbulenta devido aos efeitos de flutuabilidade (*buoyancy*) e Diff_{k_T} a difusão de k . As equações associadas a estes termos não serão apresentadas neste documento, mas podem ser consultadas em Flow Science, Inc. (2014).

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] = \frac{\text{CDIS1}}{k_T} \varepsilon_T (P_T + \text{CDIS3 } G_T) + \text{Diff}_\varepsilon - \text{CDIS2} \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (5.6)$$

O termo P_T representa a produção de energia cinética turbulenta, G_T a produção (ou decaimento) de energia cinética turbulenta devido aos efeitos de flutuabilidade (*buoyancy*) e Diff_{k_T} a difusão de ε . As constantes CDIS1 e CDIS3 têm os valores de 1.42 e 0.2, respetivamente, e CDIS2 é calculada em função do termo P_T .

A viscosidade cinemática turbulenta é calculada (em todos os modelos) através da Eq. 5.7:

$$\nu_T = \text{CNU} \frac{k_T^2}{\varepsilon_T} \quad (5.7)$$

No modelo RNG $k - \varepsilon$, a constante CNU é igual a 0.085.

5.2.7 Escalas de turbulência

No FLOW-3D[®], as escalas de tempo, T_T , e comprimento, L_T turbulentas são calculadas através da energia cinética turbulenta e da dissipação:

$$T_T = \frac{k_T}{\varepsilon_T} \quad (5.8)$$

$$L_T = \text{CNU}^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{\varepsilon_T} \quad (5.9)$$

Uma das exigências dos modelos de duas equações, onde se inclui o modelo RNG $k - \varepsilon$, é a necessidade de limitar o valor de ε_T , pois a equação para a viscosidade turbulenta, ν_T (Eq. 5.7) pode conduzir a valores de ε_T muito próximos de zero, o que resultaria em valores excessivamente altos

para a viscosidade turbulenta. Para lidar com este problema, o FLOW-3D[®] limita o valor mínimo de ε através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_{T,min} = CNU^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN} \quad (5.10)$$

O parâmetro TLEN (acrónimo para *Maximum Turbulent Length Scale*) é o valor máximo para a escala de comprimentos turbulenta. O TLEN pode ser calculado automaticamente em função do espaço e do tempo durante a simulação, ou ser definido pelo utilizador. No caso de ser calculado automaticamente, o FLOW-3D[®] calcula os limites das escalas de tempo e comprimento (baseando-se na teoria das escalas de Kolmogorov para os limites inferiores) através das seguintes expressões:

$$T_T = \max \left[T_T^{low}, \min \left(T_T^{up}, \frac{k_T}{\varepsilon_T} \right) \right] \quad (5.11)$$

$$L_T = \max \left[L_T^{low}, \min \left(L_T^{up}, CNU^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{\varepsilon_T} \right) \right] \quad (5.12)$$

Para a maior parte dos problemas, é mais fácil e mais correto ser o FLOW-3D[®] a calcular este parâmetro, exceto em casos em que a viscosidade dinâmica limite significativamente o passo de tempo de cálculo da simulação ou em casos de escoamentos com condições de fronteira móveis.

5.2.8 Condições de fronteira e condições iniciais

As equações fundamentais que descrevem o movimento dos fluidos pertencem a uma categoria de problemas designada de Problemas de Valor Inicial e Problemas de Valor de Contorno (*initial-boundary value problems*), o que significa que tanto a solução inicial (em $t=0$) como a solução nas fronteiras ao longo do tempo deve ser conhecida para que a solução em todo o domínio possa ser calculada corretamente. As condições iniciais e de fronteira assumidas pelo utilizador irão ser utilizadas na resolução das equações fundamentais, o que significa que para se encontrar uma solução numérica correta, é crucial que seja feita uma boa aproximação na definição destes condições (Flow Science, Inc., 2014).

Uma boa definição das condições de fronteira é importante para o processo iterativo, pois quanto mais as condições se aproximarem da realidade, mais depressa o processo iterativo irá convergir e fornecer resultados num menor espaço de tempo. No entanto, impõe-se mais rigor na definição das condições de fronteira do que na definição das condições iniciais, uma vez que os efeitos provocados pelas condições iniciais reduzem-se à medida que o tempo progride.

No FLOW-3D[®], é necessário definir seis condições de fronteira para cada bloco da malha (em X_{min} , $X_{máx}$, Y_{min} , $Y_{máx}$, Z_{min} e $Z_{máx}$), estando disponíveis dez tipos de condições de fronteira: *Symmetry*, *Specified pressure*, *Wall*, *Outflow*, *Specified velocity*, *Continuative*, *Grid overlay*, *Periodic* e *Wave*. De seguida, apenas se apresentam os primeiros quatro tipos de condição de fronteira mencionados, uma vez que foram os utilizados nas simulações presentes neste documento:

- *Symmetry*: não há transmissão de fluido ou calor através deste tipo de fronteira (pois esta condição define que a velocidade é nula na sua normal); é muito útil em casos em que o es-

coamento apresenta planos de simetria, possibilitando a redução do domínio computacional

- *Specified Pressure*: especifica a pressão na fronteira. No caso de também se especificar a elevação do fluido, a pressão terá uma distribuição hidrostática. A condição de fronteira de pressão hidrostática pode ser utilizada, por exemplo, na simulação de um grande reservatório de água em que não se pretende representar todo o seu domínio: a condição de pressão hidrostática substitui o reservatório, pois é suficiente para representar as condições em que o fluido se encontra dentro do mesmo. Quando utilizada na fronteira de jusante, esta condição requer que o número de Froude seja menor do que um nessa localização.
- *Outflow*: é uma condição de fronteira utilizada, essencialmente, para a representação da saída de caudal na fronteira de jusante. Apenas deve ser utilizada se o número de Froude for igual ou maior que um. Não é possível definir a altura do escoamento.
- *Wall*: aplica a condição de não-escorregamento (*no-slip*) e de impermeabilidade na fronteira, isto é, as três componentes da velocidade do fluido imediatamente junto à parede são nulas (no subcapítulo seguinte pode consultar-se uma explicação mais detalhada sobre esta condição).

5.2.9 Lei de Parede

Modelar os efeitos de parede (*wall effects*) requer atenção no que diz respeito à condição de escorregamento da superfície, à sua rugosidade e ao tamanho da malha junto à mesma, que deve ser adequado para a correta resolução do perfil de velocidades junto à parede (Flow Science, Inc., 2014).

Na interface entre um fluido viscoso e um sólido, os elementos do fluido imediatamente em contacto com a parede sólida aderem a esta, tendo por isso velocidade tangencial nula relativamente à parede, condição designada por não-escorregamento (*no-slip*). Como resultado desta condição, há uma região junto à parede sólida em que se desenvolvem tensões de corte de nível viscoso, e que vai aumentando de espessura ao longo do escoamento: é a camada limite. Na presença de uma parede sólida, considera-se que uma camada limita turbulenta é constituída por duas camadas de características distintas: uma camada interior (*inner layer*) e uma camada exterior (*outer layer*). De um modo simplificado, pode-se afirmar que a camada interior é constituída por uma sub-camada viscosa, (*viscous sub-layer*) e uma região turbulenta (*turbulent zone* ou *log-law region*) (Brederode, 2014, Burnham, 2011a).

No estudo da camada limita turbulenta, recorre-se a dois parâmetros adimensionais: y^+ , que representa a distância adimensional à parede e u^+ , que representa a velocidade longitudinal adimensional. Nas equações que se seguem, τ_w é a tensão de corte na parede, u_τ é a velocidade de atrito e y é a distância normal à parede:

$$y^+ = \frac{u_\tau y \rho}{\mu} = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (5.13)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (5.14)$$

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (5.15)$$

Na região turbulenta, o perfil de velocidades pode ser estimado através da lei logarítmica (*log law*), também conhecida como lei de parede (*wall law*):

$$u^+ = \frac{1}{K} \ln(y^+) + B \quad (5.16)$$

O FLOW-3D® não calcula a sub-camada viscosa como uma região separada do escoamento, servindo-se sempre da lei logarítmica para o cálculo das velocidades: o programa calcula o perfil de velocidades logarítmico no centróide da área aberta/livre das células adjacentes à parede sólida. Isto significa que o tamanho das células junto à parede deve ser criteriosamente selecionado, pois o centróide da célula adjacente à parede deve estar compreendido na região turbulenta (ver Fig. 5.8). Se a célula for demasiado pequena e por isso apenas incluir a sub-camada viscosa ou demasiado grande e o seu centróide atingir a camada exterior da camada limite, os perfis calculados irão estar incorretos, pois nestas zonas não se aplica a lei de parede.

Para ser válida a aplicação da lei logarítmica, y^+ deve ser superior 30 e inferior a 100-500 nas células adjacentes a paredes sólidas. O FLOW-3D® calcula os valores de y^+ , e se os valores deste parâmetro estiverem dentro do intervalo referido, então o tamanho da célula é adequado.

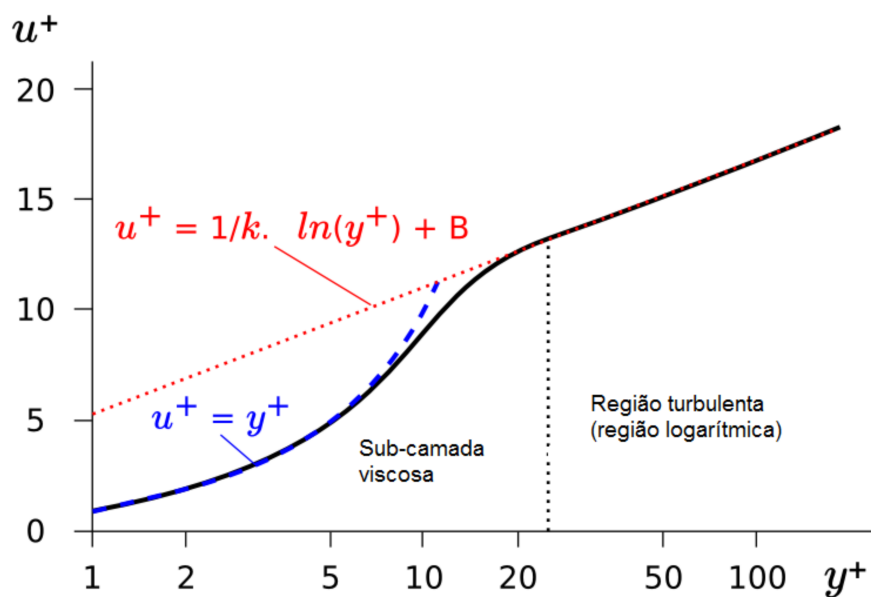


Figura 5.8: Região interior da camada limite e valores de y^+ recomendados (adaptado de CFD Online, 2015).

Capítulo 6

Implementação e calibração do modelo numérico

6.1 Geometria

Numa primeira instância, importou-se para o FLOW-3D® o ficheiro .stl, gerado no AutoCAD, que reproduz a geometria a simular, correspondente a um reservatório, seguido de um descarregador em degraus e de uma bacia de dissipação. Contudo, após recorrer-se ao ícone *FAVORize* (relembre-se o capítulo 5.2.3. em que é sucintamente explicado o método FAVOR™), verificou-se que a resolução da geometria incorporada na malha era fraca, e que as zonas dos cantos dos degraus eram mal representadas. Uma vez que a geometria é simples, decidiu-se construí-la componente a componente através das formas geométricas disponibilizadas na interface gráfica. Depois de concluída, recorreu-se novamente ao ícone *FAVORize* e, como se observa na Fig. 6.1, a resolução da geometria, junto ao canto do degrau, construída componente a componente é ligeiramente melhor do que a anterior, tendo-se optado por esta última.

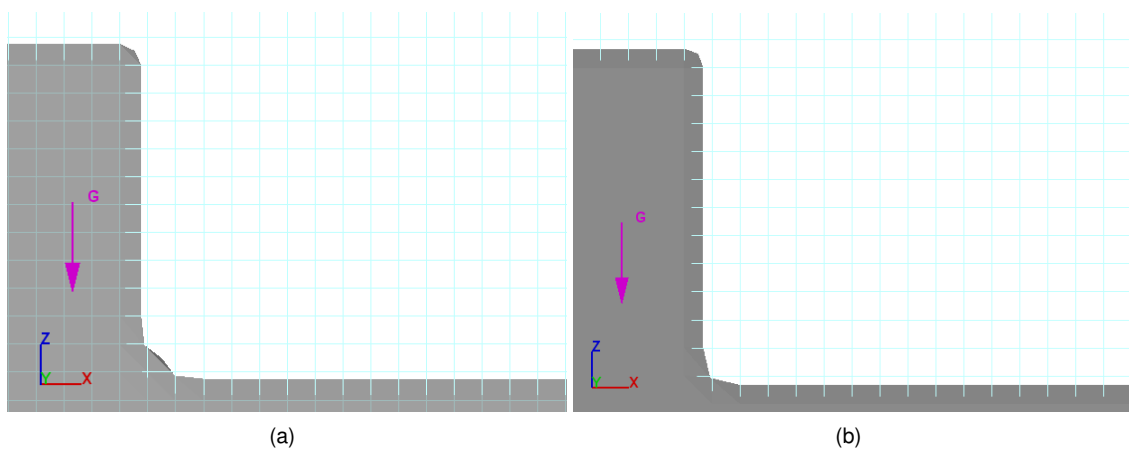


Figura 6.1: (a) *FAVORize* da geometria importada por .stl; (b) *FAVORize* da geometria construída componente a componente.

A geometria apresenta-se na Fig. 6.2. A direção x é a direção longitudinal, y a direção transversal e z a direção vertical. Salienta-se que o ângulo que a comporta de charneira faz com a horizontal é alterado consoante o caudal em estudo, por forma a que o ressalto hidráulico ocorra no pé do descarregador. Estes ângulos foram consultados em André e Ramos (2003).

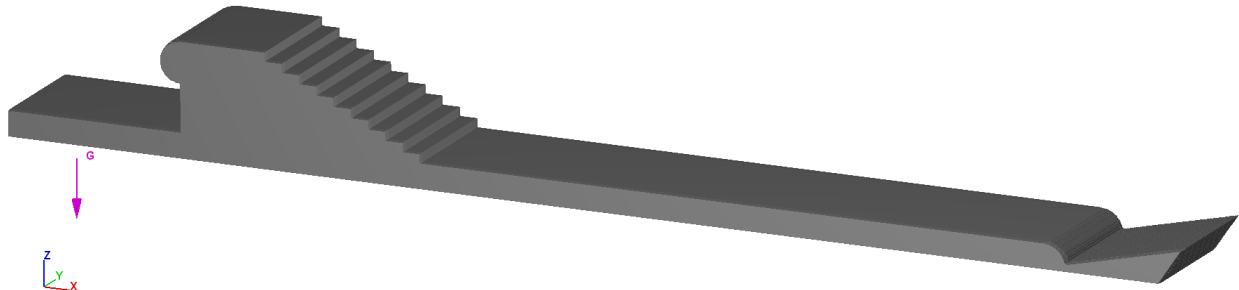


Figura 6.2: Geometria.

6.2 Malha

Apesar da turbulência ser um fenómeno tridimensional (3D), é usual realizarem-se simulações numéricas bidimensionais (2D) na análise de escoamentos em descarregadores de cheias. Em Burnham (2011b), é possível consultar uma exaustiva revisão bibliográfica de estudos realizados com o FLOW-3D® sobre descarregadores de cheia com soleiras convencionais, em labirinto e descarregadores em degraus, e onde figura a indicação se as simulações efetuadas são 2D ou 3D. Verifica-se que muitas destas simulações são 2D, como é o caso dos estudos apresentados por Savage e Johnson (2001), Johnson e Savage (2006), Bombardelli et al. (2010) e Meireles et al. (2010). Savage e Johnson (2001) analisaram o escoamento em descarregadores de soleira tipo WES e compararam resultados entre simulações 2D e 3D, chegando à conclusão de que uma análise 2D era suficiente e computacionalmente mais rápida, devido à considerável redução do número de células na malha. Deste modo, as simulações efetuadas no presente estudo também são 2D, o que se consegue através da definição de apenas uma célula na direção y .

As dimensões das células da malha foram criteriosamente selecionadas, pois têm em conta as dimensões da geometria: em todas as malhas indicadas na Tabela 6.1, o número de células em qualquer direção é sempre um número inteiro. O outro critério de seleção teve em conta uma expressão que permite estimar a dimensão necessária das células adjacentes a paredes sólidas para que se verifique $30 < y^+ < 100 - 500$ nestas células (tal como explicado no capítulo 5.2.9). Considerando, como modelo simplificativo, que se desenvolvem camadas limite turbulentas na bacia de dissipação e na soleira, e que a velocidade de referência é a velocidade média nas respetivas secções, obtém-se que a primeira célula da malha deve respeitar a seguinte condição:

$$z > 2 \cdot 10^{-36/5} \cdot 7^{9/5} \cdot 30 \sqrt{\frac{2}{0.0581}} \left(\frac{q}{h}\right)^{-9/5} \quad (6.1)$$

em que z é a dimensão vertical das células adjacentes a paredes sólidas, q é o caudal em m^3/s e h a

altura média de uma determinada região do escoamento ¹. Verificou-se que, para todos os caudais, as células junto à parede da soleira podem ser menores do que as células junto ao fundo da bacia. Tal facto veio corroborar a decisão de não se refinar a malha na zona da bacia, pois para além de não ser necessário, não seria correto. Após se terem conjugado as informações provenientes dos dois critérios de seleção, definiram-se cinco tipos de malha, que se apresentam na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Descrição das malhas utilizadas no presente estudo.

Nome	N.º de blocos	N.º de células	Dimensões das células (m)
Malha 1	1	245028	0.0083(3) x 0.0083(3)
Malha 2	1	431910	0.00625 x 0.00625
Malha 3	2	436824	Bloco 1: 0.0083(3) x 0.0083(3) Bloco 2: 0.004167(7) x 0.004167(7)
Malha 4	2	735321	Bloco 1: 0.00625 x 0.00625 Bloco 2: 0.003125 x 0.003125
Malha 5	2	1142811	Bloco 1: 0.005 x 0.005 Bloco 2: 0.0025 x 0.0025

As malhas 1 e 2 são consideradas grosseiras dadas as dimensões da geometria em estudo, e as malhas 3, 4 e 5 são mais refinadas. Nestas últimas, optou-se por refinar a malha apenas na zona do descarregador, uma vez que é nesta região que se pretendem obter resultados mais precisos, tendo sido por isso adicionado o Bloco 2. A construção destes blocos de malha mais refinados teve em conta todas as recomendações presentes no capítulo 5.2.1, e como tal, as células do Bloco 2 têm metade do tamanho das células do Bloco 1, o que resulta num rácio 2:1 (valor recomendado) entre células de blocos diferentes. Na Fig. 6.3, é possível observar a posição do Bloco 2 na malha: o Bloco 2, a verde, está contido no Bloco 1, a azul. Note-se que, tal como recomendado no capítulo 5.2.1, a fronteira entre blocos não se deve posicionar em regiões onde são esperados elevados gradientes no escoamento, e por este motivo, a fronteira encontra-se no último degrau, antes do início do ressalto hidráulico.

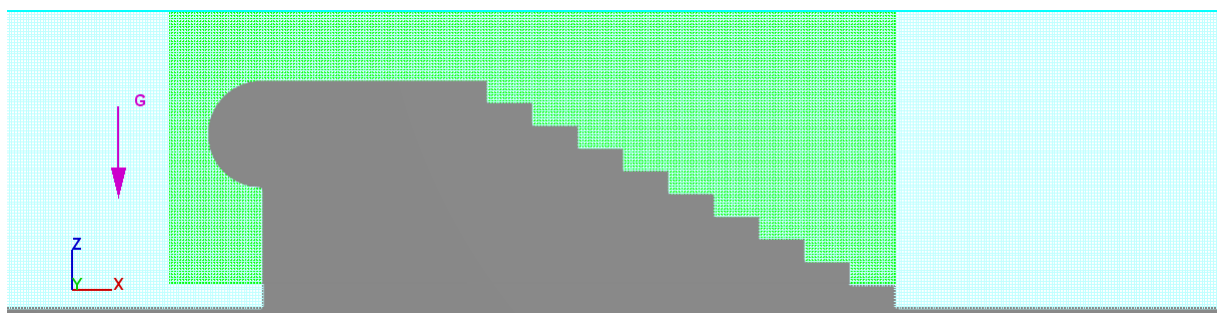


Figura 6.3: Bloco 1 (a azul) e Bloco 2 (a verde).

¹ Para a dedução da expressão 6.1, considerou-se $C_f = 0.0581Re_x^{-0.2}$, que corresponde a um escoamento turbulento desde o bordo de ataque numa placa plana e em gradiente de pressão nulo (Eça, 2008). Para efeitos de estimativa, considerou-se uma secção de controlo distanciada de 1 m do bordo de ataque.

A Fig. 6.4 apresenta um pormenor do último degrau (para uma malha 5), em que é possível observar o alinhamento e o rácio 2:1 entre as células dos dois blocos.

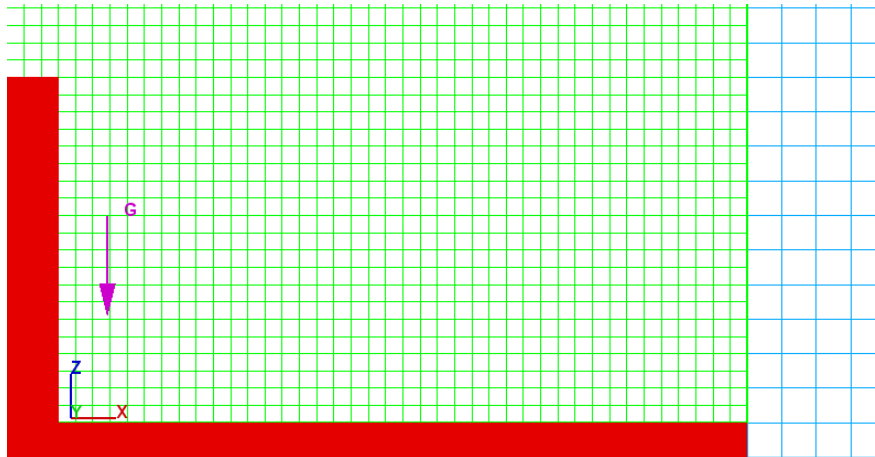


Figura 6.4: Alinhamento entre os Blocos 1 e 2.

Para avaliar a qualidade da malha, recorreu-se ao *Simulation Pre-Check* disponível no FLOW-3D®. Neste separador, foi possível consultar o *Maximum adjacent cell size ratios*, que nos dois blocos, em todos os caudais e para todas as malhas verificou-se ser igual a 1 (valor ideal). Consultou-se também o *Maximum aspect ratio*, que verificou-se ser sempre igual a 1 (valor ideal), com exceção do Bloco 2 nas direções x:y e y:z em que é igual a 2 (devido ao facto de se ter imposto apenas uma célula na direção y). O *Maximum aspect ratio* apenas não deve ser superior a 3, pelo que o valor anterior está contido na gama de valores recomendados. O *Simulation Pre-Check* também informou que não há nenhum rácio entre células de blocos diferentes maior que 2:1 em nenhuma das simulações efetuadas, o que indica que se obteve o alinhamento desejado entre os dois blocos.

6.3 Condições de fronteira

Na fronteira de montante, X_{\min} , definiu-se uma condição de pressão (*specified pressure*) na qual se especificou, para cada caudal, a altura de água medida experimentalmente nessa fronteira por Cabrita (2007). Em Z_{\min} , definiu-se uma condição de fronteira sólida (*wall*), pelos motivos apresentados no subcapítulo 5.2.9, e em Y_{\min} e Y_{\max} definiram-se condições de simetria (*symmetry*). Em Z_{\max} especificou-se uma condição de pressão com fração de fluido igual a zero (i.e, vazio) e uma pressão constante igual à atmosférica (101325 Pa) a aplicar em toda a região de vazio acima da superfície livre (ar).

A decisão sobre a posição e a condição a aplicar na fronteira de jusante, X_{\max} , exigiu um pouco mais de atenção. Inicialmente, definiu-se um domínio que não incluía a região final da bacia de dissipação, com o objetivo de reduzir o n.º de células e o tempo de computação. Este domínio possuía uma condição de fronteira de jusante situada numa secção em que, experimentalmente, já não se verificava a presença de ar emulsionado (a jusante do ressalto hidráulico). Nesta secção, conhecia-se a altura de água, medida experimentalmente por André e Ramos (2009), pelo que se especificou uma condição de pressão. No entanto, após se efetuarem simulações com este domínio computacional, verificou-se que, recorrentemente, se geravam ondas de pressão na zona da bacia de dissipação, e que o

ressalto hidráulico era afogado e muito instável. Nesta situação, as simulações nunca chegavam a atingir o regime permanente (ver subcapítulo 5.3.5). Para evitar estes problemas, decidiu-se simular toda a bacia de dissipação e a comporta de charneira, o que conduziu à utilização de uma condição de *outflow* na fronteira de jusante. Esta condição só pode ser utilizada quando $Fr \geq 1$. Apesar de no final da bacia de dissipação o regime ser lento ($Fr < 1$), a comporta de charneira provoca no escoamento um aumento do número de Froude, tal como se pode observar na Fig. 6.5.

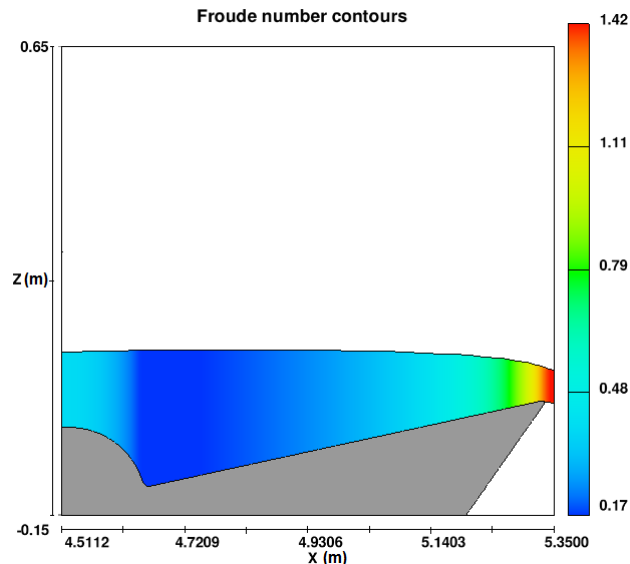


Figura 6.5: Número de Froude na fronteira de jusante, $X_{m\acute{a}x}$.

6.4 Condições iniciais e condições finais

Como condição inicial, definiu-se uma região de fluido no reservatório de montante com altura de água igual à que foi especificada na condição de fronteira de montante. Deste modo, quando a simulação tem início, o reservatório de montante já se encontra cheio de água, o que permite acelerar o processo de obtenção de uma solução.

Como condição de finalização, definiu-se um tempo de simulação (*finish time*) igual a 100 segundos. Neste estudo, só se consideraram válidas as simulações que atingiram o *steady-state*, isto é, o regime permanente. Este regime é atingido quando os valores de determinadas variáveis tornam-se praticamente constantes e variam menos de 1% no decorrer da simulação, sendo estas variáveis a massa total, a energia cinética média, a energia cinética turbulenta média e a dissipação média da energia cinética turbulenta. Na interface gráfica, é indicado o instante de tempo em que a simulação atinge o regime permanente que, para todas as simulações, ocorre para tempos de simulação inferiores a 100 segundos. Optou-se por não definir a condição de regime permanente como condição final, para se poder estudar a evolução de outras quantidades até aos 100 segundos, pois caso contrário a simulação terminaria assim que se atingisse este regime. No Anexo A, encontram-se exemplos dos gráficos das quantidades acima mencionadas obtidos para $q=0.06\text{m}^2/\text{s}$ e malha 3.

6.5 Modelos físicos

Os modelos físicos ativados foram: *Gravity*, *Viscosity and Turbulence*, *Air Entrainment*, *Density Evaluation*, *Drift Flux* e *Bubble and phase change*.

Em *Viscosity and Turbulence*, ativou-se o modelo de duas equações RNG $k - \varepsilon$ devido às características enunciadas no subcapítulo 4.2.4 e por ser o modelo mais utilizado e recomendado por outros autores na simulação de descarregadores em degraus, como se comprova na Tabela 2.1. Depois de se ter realizado uma análise de sensibilidade ao parâmetro TLEN, que pode ser consultada no subcapítulo 6.8.4, optou-se por atribuir ao FLOW-3D® o cálculo automático deste parâmetro (*dynamically computed*).

O modelo do *Air Entrainment*, desenvolvido por Hirt (2003), baseia-se no critério de que para haver a entrada de um volume de ar por unidade de tempo no escoamento, δV , a energia desestabilizadora por unidade de volume, P_T , tem de ser superior à energia das forças estabilizadoras, P_D , associadas à gravidade e tensão superficial. As equações que descrevem este critério são as seguintes (Hirt, 2003, Bombardelli, 2012, Meireles et al., 2014):

$$L_T = C_\mu \left(\frac{3}{2} \right)^{1/2} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (6.2)$$

$$P_T = \rho k \quad (6.3)$$

$$P_D = \rho g L_T + \frac{\sigma}{L_T} \quad (6.4)$$

$$\delta V = \begin{cases} C_{ar} A_s \left[\frac{2(P_T - P_D)}{\rho} \right]^{1/2} & \text{se } P_T \geq P_D \\ 0 & \text{se } P_T < P_D \end{cases} \quad (6.5)$$

em que L_T é a escala que representa uma perturbação turbulenta, C_{ar} é um coeficiente de proporcionalidade, σ a tensão superficial, k a energia cinética turbulenta, ε a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, ρ a densidade do fluido, g a aceleração da gravidade e A_s a área da superfície na qual o ar entra (Bombardelli, 2012). Quando a quantidade de ar que entra no sistema é relativamente pequena (<10%), é suficiente ativar apenas este modelo, que sendo passivo, não altera a dinâmica do escoamento (Flow Science, Inc., 2014). Neste modelo, é necessário definir o valor do coeficiente de entrada de ar (*Entrainment rate coefficient*), que, por omissão, é igual a 0.5. É também necessário definir o valor do coeficiente de tensão superficial, que por omissão é igual a 0.073 N/m (água a 20° C), mas que foi considerado nulo (Anexo B).

Quando a quantidade de ar que entra no sistema é significativa e afeta o escoamento, é necessário ativar o modelo *Density Evaluation* e o modelo *Drift Flux*. O modelo *Density Evaluation* tem em conta o efeito da não-uniformidade do escoamento provocada pela entrada de ar (*bulking*). Este modelo controla o modo como a densidade é calculada, que pode ser função de outras quantidades (como a salinidade e temperatura), ou função de uma equação de transporte de densidade de 1ª ou 2ª ordem. No presente estudo, seleccionou-se uma equação de 2ª ordem para o cálculo da densidade (*second*

order monotonicity preserving approximation to density transport equation), visto que a utilização de uma equação de 2ª ordem permite a obtenção de resultados mais rigorosos (Flow Science, Inc. (2014)). O modelo *Drift Flux* tem em conta os efeitos de flutuabilidade (*buoyancy*) decorrentes da interação de uma fase dispersa (componente de menor densidade, tais como bolhas de ar) inserida numa fase contínua (fluido de maior densidade). Este modelo requer a definição de vários parâmetros:

- Coeficiente de arrastamento (*Drag Coefficient*): em Flow Science, Inc. (2013), recomenda-se que este coeficiente seja igual a 0.95 para situações semelhantes à do presente estudo;
- Raio médio das partículas (*Average particle radius*): em Flow Science, Inc. (2013), recomenda-se que para bolhas de ar, o raio seja de 2 mm;
- Viscosidade da fase #1 (*Viscosity of phase #1*): viscosidade da água, definida como $0.001 \text{ Nm}^{-2}\text{s}$;
- Viscosidade da fase #2 (*Viscosity of phase #2*): viscosidade do ar, definida como $1,7\text{e-}05 \text{ Nm}^{-2}\text{s}$;
- Densidade da fase #1 (*Density of phase #1*): densidade da água, definida como 1000 kg/m^3 ;
- Densidade da fase #2 (*Density of phase #2*): densidade do ar, definida como 1.225 kg/m^3 ;

No presente estudo, ativou-se a opção *Allow gas to escape at free surface*, que possibilita que as bolhas de ar que ascendem (*drift*) até à superfície possam escapar para a região de vazio (ar). No FLOW-3D®, bolhas de ar no seio de um escoamento são reconhecidas como regiões de vazio rodeadas por fluido. No modelo *Bubble and Phase Change*, ativou-se a opção *Adiabatic Bubbles*, que atribui às bolhas de ar uma relação pressão-volume-temperatura característica de um processo adiabático.

6.6 Opções numéricas

Para o cálculo da advecção da fração de fluido (*VOF advection options*), o FLOW-3D® disponibiliza as seguintes opções: *Automatic* (opção por omissão, que seleciona automaticamente a melhor opção consoante o problema, de entre as que de seguida se apresentam), *One-fluid free surface*, *Two fluids with sharp interface*, *Unsplit Lagrangian method* e *Split Lagrangian method*.

As aproximações de diferenças finitas utilizadas no processo de discretização podem ser de 1ª ordem, 2ª ordem, ou 2ª ordem com preservação da monotonicidade.

No presente estudo, experimentaram-se todas as combinações possíveis entre as opções mencionadas nos 1º e 2º parágrafos. Inicialmente, pensou-se que uma aproximação de 2ª ordem com preservação da monotonicidade seria a mais adequada, pois em Flow Science, Inc. (2014) é referido que esta opção é a mais adequada em situações de escoamentos com vorticidade. De facto, com esta opção, verificava-se maior entrada de ar no escoamento. No entanto, também se verificaram instabilidades nos perfis de velocidade dos degraus, o que não acontece com uma aproximação de 1ª ordem. Esta situação já foi reportada à equipa técnica do FLOW-3D®, que confirmou tratar-se de um problema do próprio algoritmo e não de um possível erro na implementação do modelo do presente estudo. Como tal, utilizou-se a opção automática para o cálculo da advecção (que selecionou a opção *One-fluid free surface*) e uma aproximação de 1ª ordem.

Para a resolução do esquema numérico e obtenção da solução numérica, escolheu-se o método iterativo e de aproximação implícita GMRES (*Generalized Minimum Residual Solver*), por ser o método que, na maior parte dos problemas, é mais rigoroso, eficiente e que converge mais rapidamente (Flow Science, Inc., 2014).

6.7 Metodologia para obtenção de grandezas características do escoamento no descarregador

Neste estudo, pretendem obter-se os perfis de velocidade na direção normal à soleira fictícia (*pseudo-bottom*) nas extremidades de cada degrau, e as alturas de água ao longo do descarregador medidas relativamente à soleira fictícia. No gráfico das alturas de água, o eixo das abcissas, L , corresponde à distância ao longo da soleira fictícia, e o eixo das ordenadas, h , à altura do escoamento (Fig. 6.6).

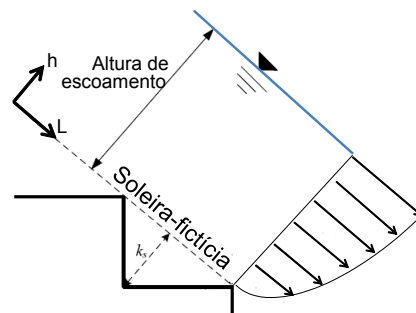


Figura 6.6: Eixos utilizados no estudo das grandezas características do descarregador.

Uma vez que a malha do FLOW-3D® é estruturada e retangular, apenas se obtém resultados diretamente nas direções ortogonais x , y e z . Para se obterem resultados noutras direções, é necessário gerar um ficheiro de coordenadas, denominado *transf.in*, no qual se especificam as coordenadas em que se pretendem obter os valores das variáveis de interesse. De modo a automatizar o processo, escreveu-se um código MATLAB, que possibilita o seguinte procedimento:

1. O utilizador opta entre gerar um perfil de velocidades (especificando o degrau) ou um gráfico de alturas de água (Fig. 6.7). Consoante o pedido do utilizador, o MATLAB cria automaticamente um ficheiro de coordenadas *transf.in* e guarda-o na diretoria da simulação.

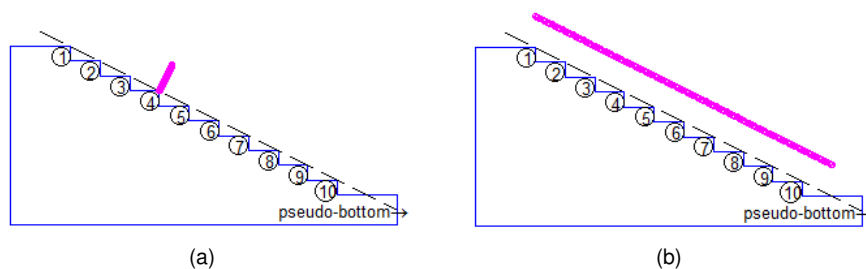


Figura 6.7: Coordenadas a rosa: (a) coordenadas do ficheiro *transf.in* para obtenção do perfil de velocidades na vertical 4; (b) coordenadas do ficheiro *transf.in* para obtenção da altura do escoamento relativamente à soleira fictícia.

2. No FLOW-3D[®], selecionam-se as variáveis de interesse para o cálculo das quantidades pretendidas. No caso de se querer um perfil de velocidades, selecionam-se as componentes u e w . A pedido do utilizador, o FLOW-3D[®] interpola os valores das variáveis selecionadas nas coordenadas especificadas no *transf.in*. Esta informação é transferida para o MATLAB num ficheiro denominado *transf.out*, ou *Neutral file*.
3. O MATLAB processa a informação recebida no *Neutral File* e decompõe os valores das variáveis nas direções pretendidas.

6.8 Análises de sensibilidade

6.8.1 Convergência

Como mencionado na pág. 31 do presente estudo, os resíduos são uma medida da convergência do problema e podem ser monitorizados no GUI durante a simulação. Na Fig. 6.8, o EPSI representa o critério de convergência para o cálculo iterativo das pressões que vai sendo calculado automaticamente como função do passo de cálculo (*time-step*). Se o *Max Residual* for inferior ao EPSI e não aumentar no decorrer da simulação, então a simulação terá convergido. Obtiveram-se gráficos semelhantes ao apresentado em todas as simulações, pelo que se pode concluir que todas convergiram.

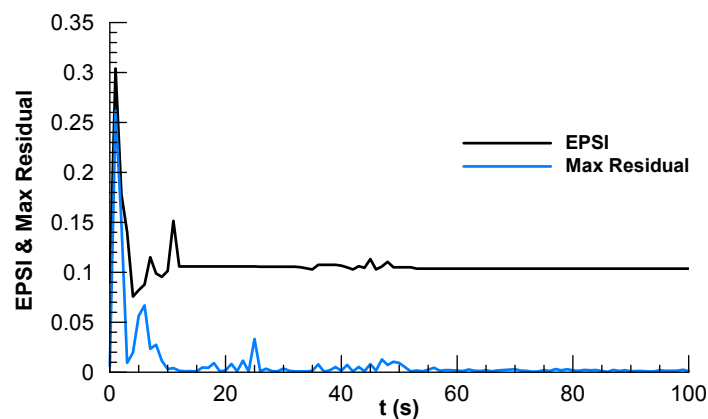


Figura 6.8: Monitorização do critério da convergência durante o decorrer de uma das simulações efetuadas.

6.8.2 Independência da malha

Realizou-se um estudo de independência da malha para o caudal de 35 l/s (0.05 m²/s), no qual foram testadas as cinco malhas descritas na Tabela 6.1. Neste estudo, serão apresentadas as diferenças relativas entre malhas, $\delta(\%) = \frac{V - V_{ref}}{V_{ref}} \cdot 100$, em que o valor de referência, V_{ref} , é considerado o valor correspondente à malha mais refinada. A Fig. 6.9 apresenta os perfis de velocidade correspondentes à secção 2 da soleira obtidos através das diferentes malhas. A maior diferença relativa entre as malhas 1 e 5 é de 5.8%, o que demonstra a necessidade de refinamento da malha.

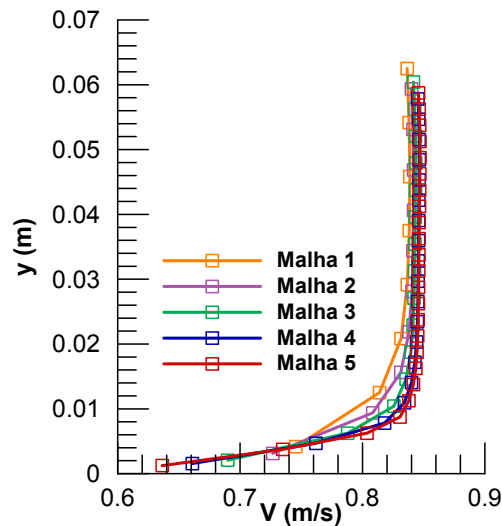


Figura 6.9: Perfis de velocidade na seção 2 da soleira descarregadora para $q=0.05\text{m}^2$.

Na Fig. 6.10, apresentam-se os perfis de velocidade para as 4 seções da soleira obtidos apenas para as duas malhas mais refinadas. Os diferentes símbolos indicam diferentes seções: os quadrados referem-se à seção 1, os triângulos à seção 2, os círculos à seção 3 e os losangos à seção 4. As diferenças médias relativas entre os valores das malhas 4 e 5 são iguais a 0.4%, 0.3%, 0.2% e 0.2% nas seções 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

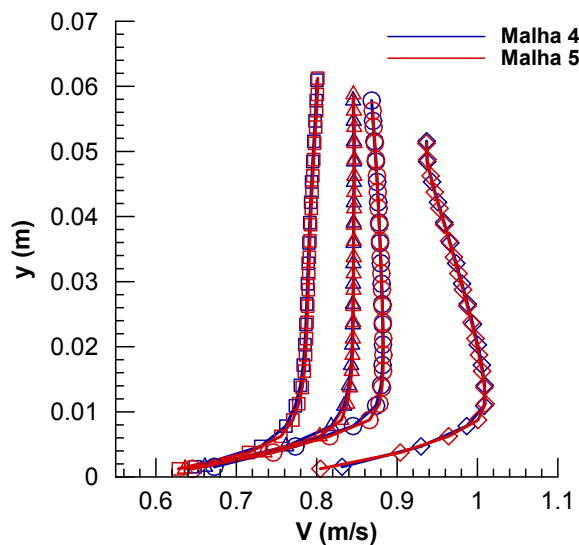


Figura 6.10: Perfis de velocidade em 4 seções da soleira descarregadora para $q=0.05\text{m}^2$.

Na Fig. 6.11, apresentam-se as alturas do escoamento na soleira descarregadora obtidas com as diferentes malhas. A diferença relativa média entre as malhas 1 e 5 é de 1.1% e entre as malhas 4 e 5 é de 0.1%. Tendo em conta as diferenças relativas médias calculadas, conclui-se que as soluções correspondentes às malhas 4 e 5 não apresentam diferenças significativas entre si, tendo sido obtida uma solução independente da malha.

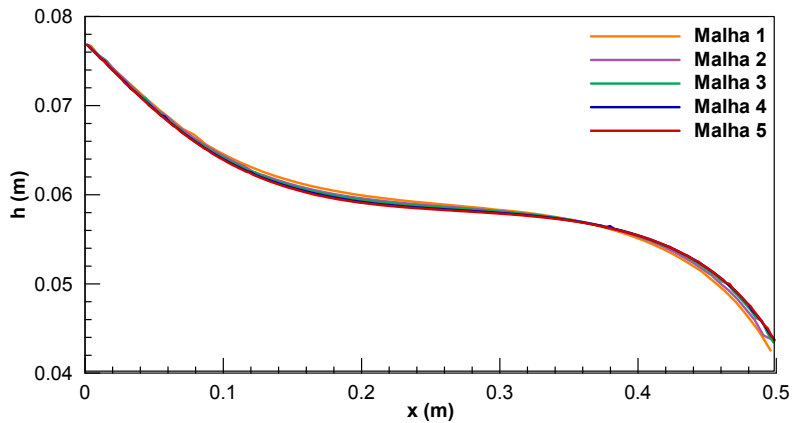


Figura 6.11: Alturas de água na soleira descarregadora para $q=0.05\text{m}^2$.

O descarregador em degraus divide-se numa região não arejada a montante da secção de afloramento da camada limite e numa região arejada a jusante desta secção. Após análise dos resultados obtidos através do FLOW-3D[®], verificou-se que a quantidade de ar que entra no sistema depende das dimensões da malha, o que afeta tanto as velocidades como as alturas de água. Na Fig. 6.12, observa-se que na região inicial do descarregador, as alturas de água correspondentes às malhas mais refinadas são coincidentes, o que não acontece na fase final do descarregador, que já se encontra na região arejada: quanto mais refinada a malha, mais quantidade de ar entra no sistema e consequentemente, maior é o empolamento da veia líquida.

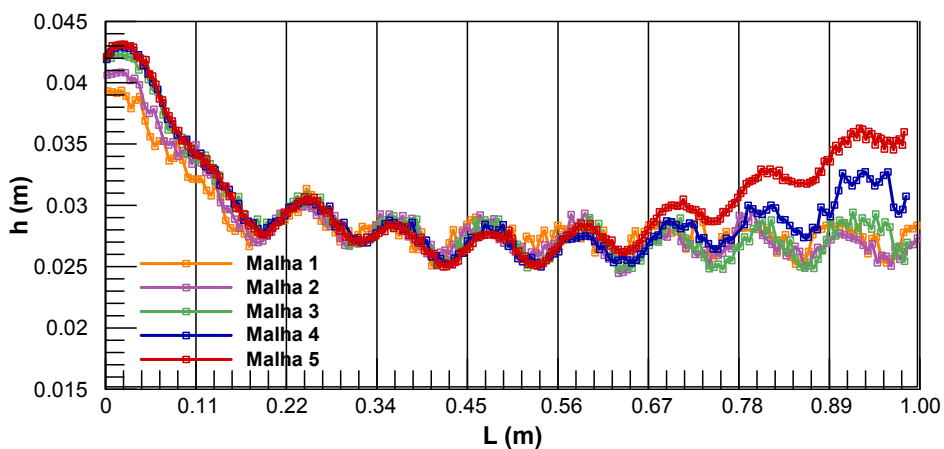


Figura 6.12: Alturas do escoamento no canal descarregador para $q=0.05\text{m}^2$.

A vertical 1 corresponde a $L=0$ m, a vertical 2 a $L=0.11$ m, e assim sucessivamente. O 1.º degrau está compreendido entre $0 \leq L < 0.11$, e o 2.º degrau está compreendido entre $0.11 \leq L < 0.22$, e assim sucessivamente. A diferença relativa média entre as malhas 4 e 5 até $L=0.56\text{m}$ é de 0.8%, e para $L > 0.56\text{m}$ é de 8.0% (nesta região, a maior diferença é de 16.2%). Na Fig. 6.13, retirada do FLOW-3D[®], é possível verificar a influência que a dimensão da malha tem na quantidade de ar que entra no descarregador.

Observa-se que o degrau em que se verifica a entrada de ar na Fig. 6.13 coincide com o degrau em que se observa o aumento da altura de água representada na Fig. 6.12 e com o degrau de entrada de ar na Fig. C.1(a) do Anexo C (6.º degrau).

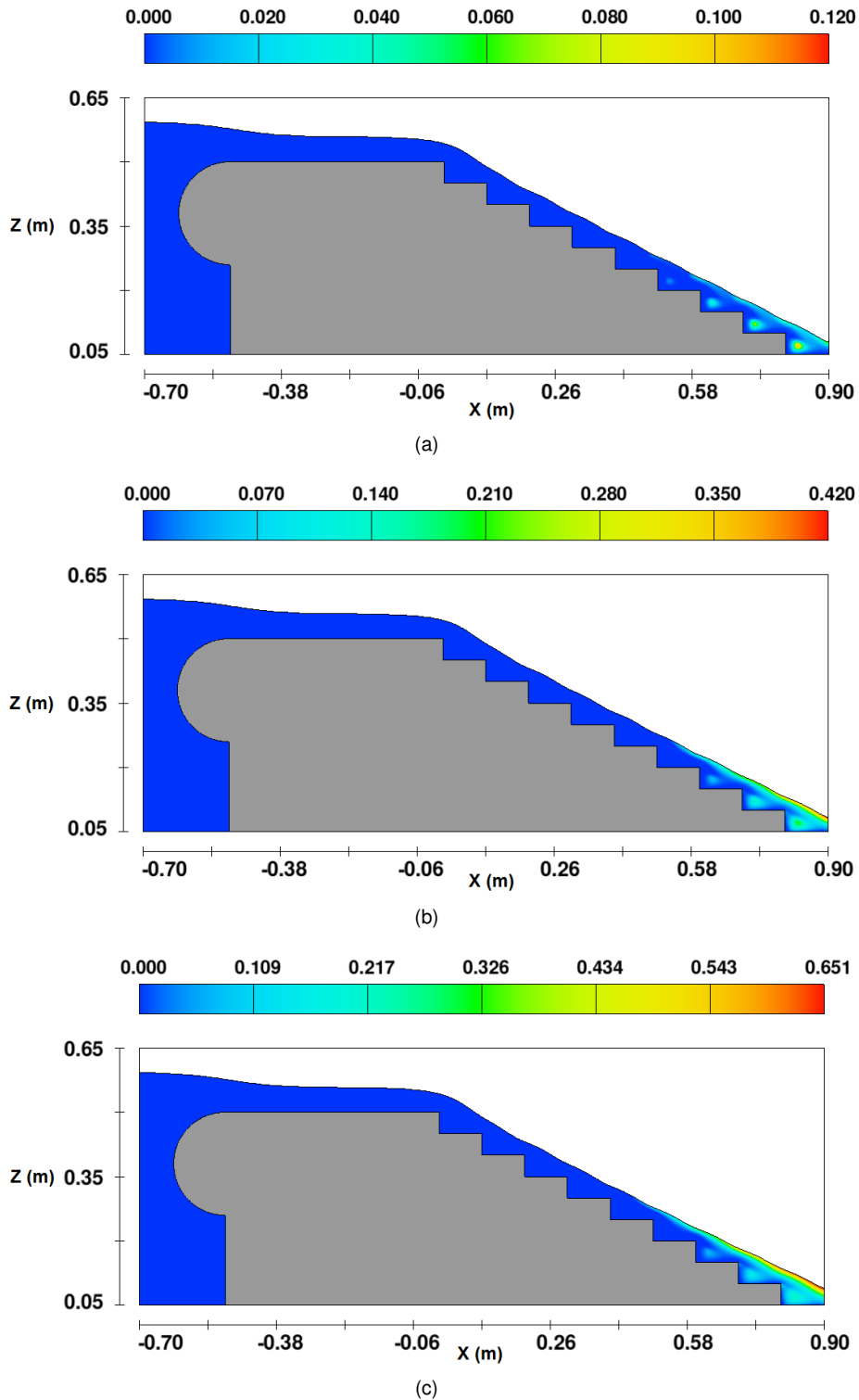


Figura 6.13: Campo de concentração de ar: (a) malha 3; (b) malha 4; (c) malha 5.

A Fig. 6.14(a) apresenta os perfis de velocidade na vertical 2 do descarregador obtidos com as diferentes malhas. Apesar dos perfis não apresentarem a mesma resolução junto à soleira fictícia, convergem para o mesmo valor. Na Fig. 6.14(b) apresentam-se os perfis de velocidade na vertical 4. Para esta vertical, observa-se que os perfis correspondentes às malhas mais grosseiras afastam-se consideravelmente dos perfis correspondentes às malhas mais refinadas.

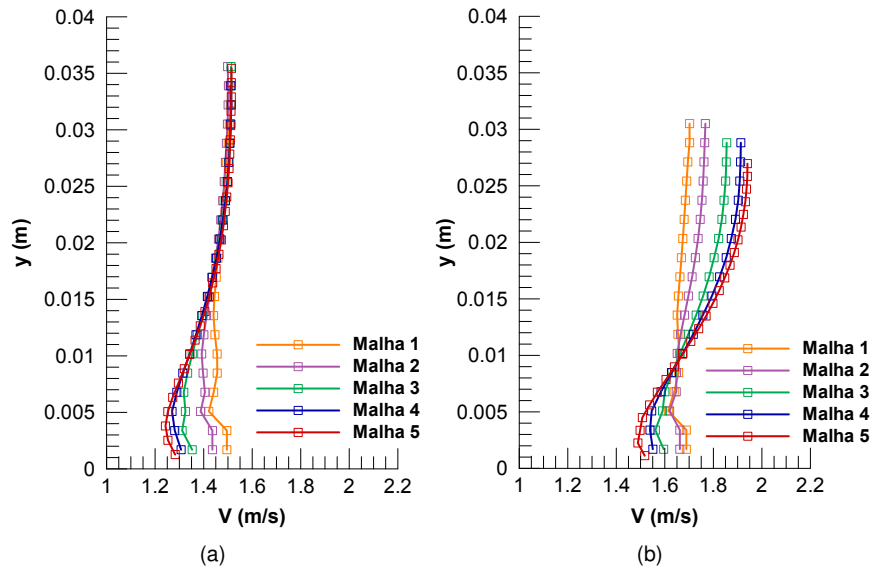


Figura 6.14: Perfis de velocidade no canal descarregador em degraus para $q=0.05\text{m}^2$: (a) vertical 2 ; (b) vertical 4.

Para analisar com mais pormenor o comportamento das malhas 4 e 5 no descarregador em degraus, apresenta-se a Fig. 6.15. Os diferentes símbolos referem-se a perfis obtidos em diferentes verticais: os quadrados referem-se à vertical 2, os triângulos à vertical 3, os círculos à vertical 4 e os losangos à vertical 6. Ao contrário do que se verifica na soleira, os perfis das malhas 4 e 5 não convergem sempre: à medida que se avança para a região arejada do descarregador, os respetivos perfis vão-se afastando. A diferença relativa média entre as malhas 4 e 5 na vertical 2 é de 0.6 %, na vertical 3 é de 0.9 %, na vertical 4 é de 1.3 % e na vertical 6 é de 1.4 %.

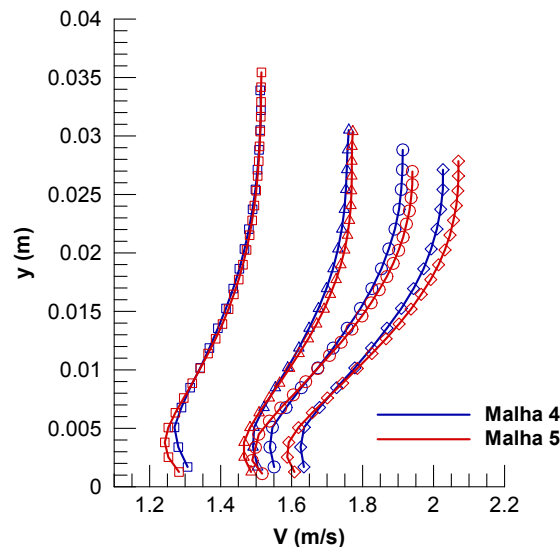


Figura 6.15: Comparação entre as malhas 4 e 5 para $q=0.05\text{m}^2$: perfis de velocidade em quatro verticais do canal descarregador em degraus.

Conclui-se que na soleira e na região não arejada do escoamento no descarregador, as malhas 4 e 5 convergiram, ao contrário da zona arejada, que é sensível (mas não significativamente) à dimensão da malha.

6.8.3 Distância adimensional à parede (y^+)

Depois de efetuadas as simulações, analisaram-se os valores de y^+ . No Anexo D, podem consultar-se os valores de y^+ das células adjacentes à parede sólida, na soleira e no início bacia de dissipação, para os caudais de 42 e 56 l/s. Como se pode verificar, apenas na bacia se encontram uma ou duas células (assinaladas a vermelho) abaixo de $y^+ = 30$, pelo que está garantida a validade da aplicação da lei logarítmica no cálculo das velocidades.

6.8.4 Parâmetro TLEN

No subcapítulo 5.2.7, apresentou-se o parâmetro TLEN (*Maximum Turbulent Length Scale*), que pode ser calculado automaticamente ou ser predefinido para um valor constante pelo utilizador. Em problemas de hidráulica, recomenda-se que, no caso de se predefinir um valor, este seja, aproximadamente, 7% da escala de comprimentos característica do escoamento. No caso de escoamentos em descarregadores, o comprimento característico deverá ser a altura de água sobre o mesmo (Burnham, 2011a). Com base nesta informação, calcularam-se alguns valores possíveis para TLEN, presentes na Tabela 6.2, que foram os utilizados na análise de sensibilidade. O tempo computacional refere-se ao tempo necessário para a simulação atingir o regime permanente.

Tabela 6.2: Comparação entre diferentes valores do parâmetro TLEN simulados.

q (l/s)	q (m ² /s)	h _c /h	Tipo de malha	TLEN (m)	Tempo computacional	Ressalto hidráulico
42	0,06	1,43	Malha 4	Calculado automaticamente	12h:12min	Estável
				0.004	7h:7min	Pequena altura de água; não propagou
				0.006	7h:39min	Pequena altura de água; não propagou
				0.008	9h:30min	Não propagou
				0.01	9h:20min	Praticamente estável
				0.02	9h:35min	Estável

Em geral, com valores de TLEN mais baixos, as simulações demoram menos tempo a atingir o regime permanente. Contudo, o ressalto hidráulico não é propagado corretamente de jusante para montante, e conseqüentemente, não atinge o pé do descarregador. Quanto maior o TLEN, melhor a representação da propagação do ressalto, que se mantém localizado no pé do descarregador sem submergir para os degraus. No entanto, como o problema em estudo tem diferentes escalas de comprimento características (escoamento na soleira horizontal, escoamento deslizante sobre turbilhões nos degraus e ressalto hidráulico na bacia de dissipação), optou-se por realizar as simulações recorrendo ao cálculo automático deste parâmetro (*dynamically computed*), que é a opção mais recomendada em Flow Science, Inc. (2014). No Anexo E, apresenta-se a propagação do ressalto hidráulico numa das simulações efetuadas. A utilização de um valor constante de TLEN é recomendada quando a viscosidade dinâmica das simulações efetuadas através do cálculo automático do TLEN limita significativamente o passo de cálculo, o que não se verificou no presente estudo. Nas Figs. seguintes,

apresenta-se uma comparação entre simulações realizadas com $TLEN=0.008$ e o $TLEN$ calculado automaticamente. Como se pode verificar, para o caso em que o $TLEN$ é calculado automaticamente, a energia turbulenta é superior, o que favorece a entrada de ar no descarregador. A Fig. 6.16 apresenta a comparação das alturas do escoamento obtidas em simulações com diferentes $TLEN$. Verifica-se que as alturas do escoamento na região não-arejada não são afetadas pelos diferentes valores de $TLEN$. Contudo, é possível observar um ligeiro aumento da altura do escoamento no final do descarregador na simulação em que o $TLEN$ é calculado automaticamente, o que deverá ser consequência da maior concentração de ar desta simulação em relação às restantes.

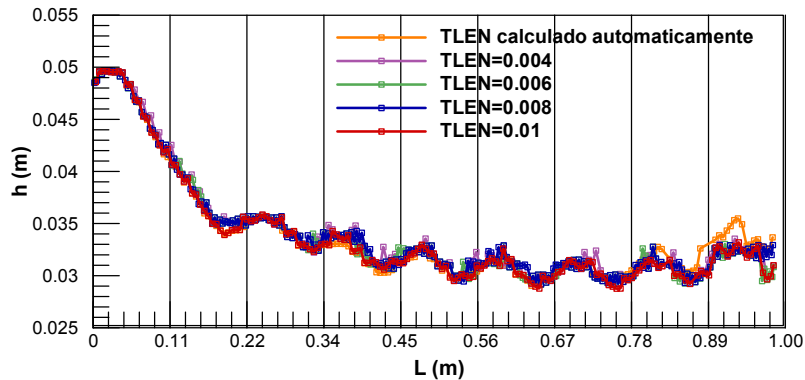


Figura 6.16: Comparação das alturas do escoamento calculadas com diferentes valores de $TLEN$ ($Q=42$ l/s e malha 4).

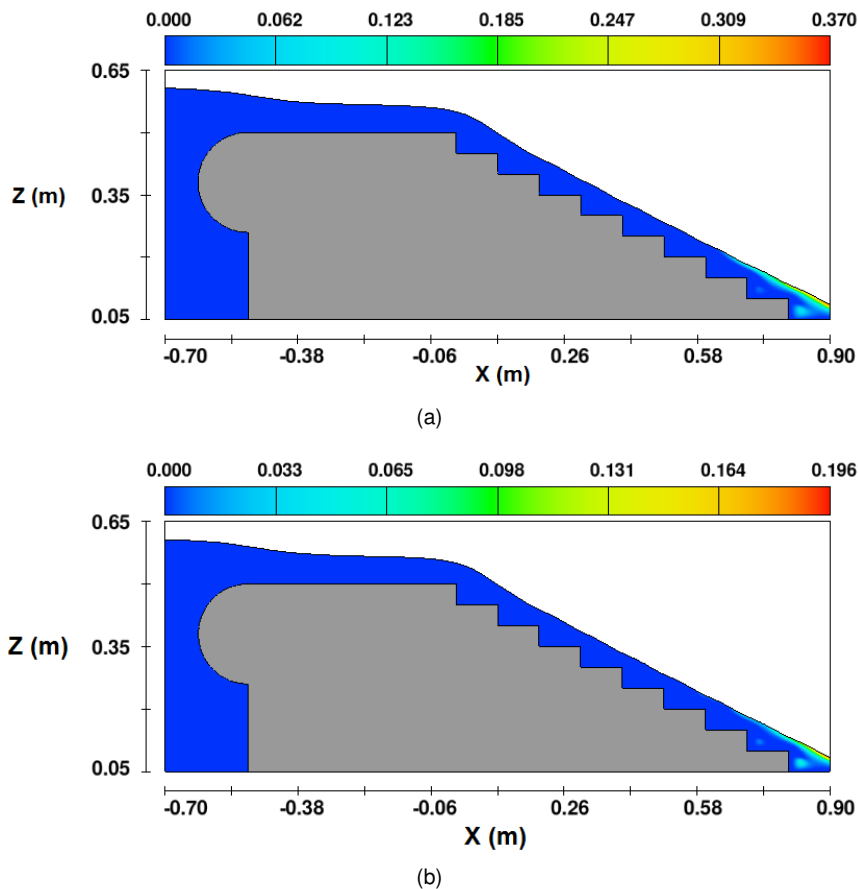
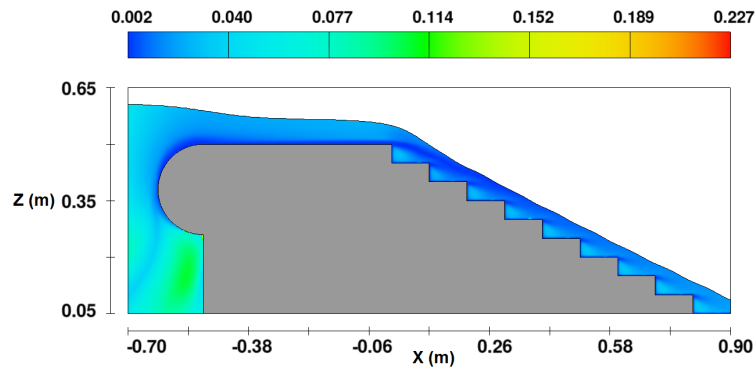
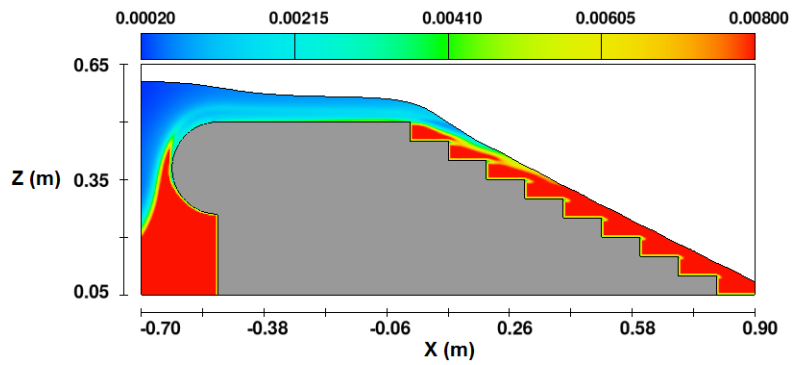


Figura 6.17: Campo de concentração de ar: (a) $TLEN$ calculado automaticamente; (b) $TLEN=0.008$.

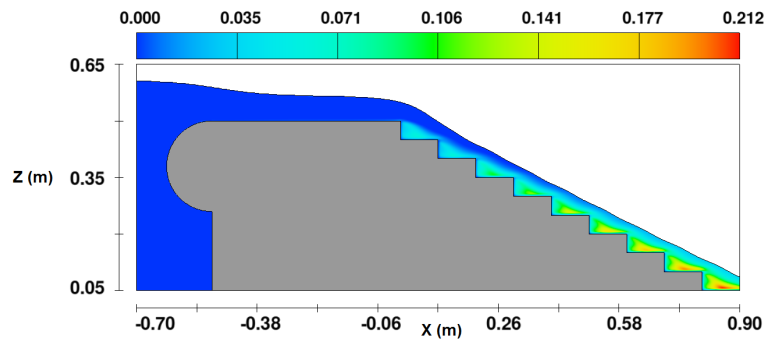


(a)

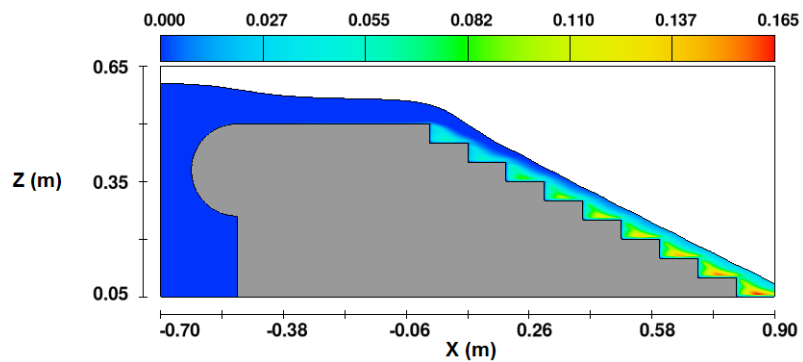


(b)

Figura 6.18: Escala de comprimentos turbulentos (m): (a) TLEN calculado automaticamente; (b) TLEN=0.008.



(a)



(b)

Figura 6.19: Energia turbulenta (J/kg): (a) TLEN calculado automaticamente; (b) TLEN=0.008.

Capítulo 7

Resultados

As simulações numéricas foram realizadas num computador com processador Intel Core i7-2600 3.40GHz e memória RAM de 8.00 GB. Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através das simulações apresentadas na Tabela 7.1. O tempo computacional refere-se ao tempo necessário até a simulação atingir o regime permanente. Nas simulações efetuadas considerou-se nulo o coeficiente de tensão superficial.

Tabela 7.1: Resumo das simulações realizadas no presente estudo.

Q (l/s)	q (m ² /s)	h _c /h _d	Tipo de malha	TLEN	Tempo computacional
35	0.05	1.27	1	Calculado automaticamente	1h:47m:15s
			2		05h:03:59s
			3		03h:44min:26s
			4		08h:42m:39s
			5		1dia:7h:43m:09s
42	0.06	1.43	4	Calculado automaticamente, TLEN=0.004, TLEN=0.006 TLEN=0.008, TLEN=0.01, TLEN=0.02	Ver Tabela 6.2
			5	Calculado automaticamente	1dia:03h:21m:21s
49	0.07	1.59	1	Calculado automaticamente	1h:45min:27s
			2		03h:30m:56s
			3		04h:18m:25s
			4		10h:15m:16s
			5		1dia:2h:24m:48s
56	0.08	1.74	3	Calculado automaticamente	5h:31m:11s
			4		14h:55min:07s

Neste capítulo, define-se a diferença relativa entre um valor experimental e um valor numérico como

$$\delta = \frac{V_{numérico} - V_{experimental}}{V_{experimental}} \cdot 100.$$

7.1 Caudal

Na implementação do modelo numérico, não se impôs o caudal em nenhuma das condições de fronteira, tendo sido apenas definida a altura de água na fronteira de montante. Como tal, é importante verificar se o caudal obtido na solução numérica corresponde ao caudal que se pretende simular. Na Tabela 7.2, a diferença δ_1 refere-se à diferença relativa entre o caudal experimental, q_{exp} , e o caudal na fronteira de montante, $q_{num}(X_{min})$, em $t=100$ s, e δ_2 refere-se à diferença relativa entre o caudal experimental, q_{exp} , e o caudal na fronteira de jusante, $q_{num}(X_{máx})$, em $t=100$ s.

Tabela 7.2: Diferenças relativas entre os caudais experimentais e numéricos nas fronteiras de montante e jusante (malha 4).

Q_{exp} (l/s)	q_{exp} (m ² /s)	$q_{num}(X_{min})$ (m ² /s)	$q_{num}(X_{máx})$ (m ² /s)	δ_1 (%)	δ_2 (%)
35	0.05	0.0484	0.0463	-3.1	-7.4
42	0.06	0.0601	0.0589	0.2	-1.8
49	0.07	0.0686	0.0654	-2.1	-6.6
56	0.08	0.0768	0.0762	-4.1	-4.7

As diferenças δ_2 são superiores às δ_1 , o que pode ser explicado pelo facto de não se ter imposto a altura de água na fronteira de jusante. Contudo, as diferenças não são significativas. A Fig. 7.1, apresenta a evolução temporal do caudal nas fronteiras de montante e jusante para a totalidade dos caudais e malha 4.

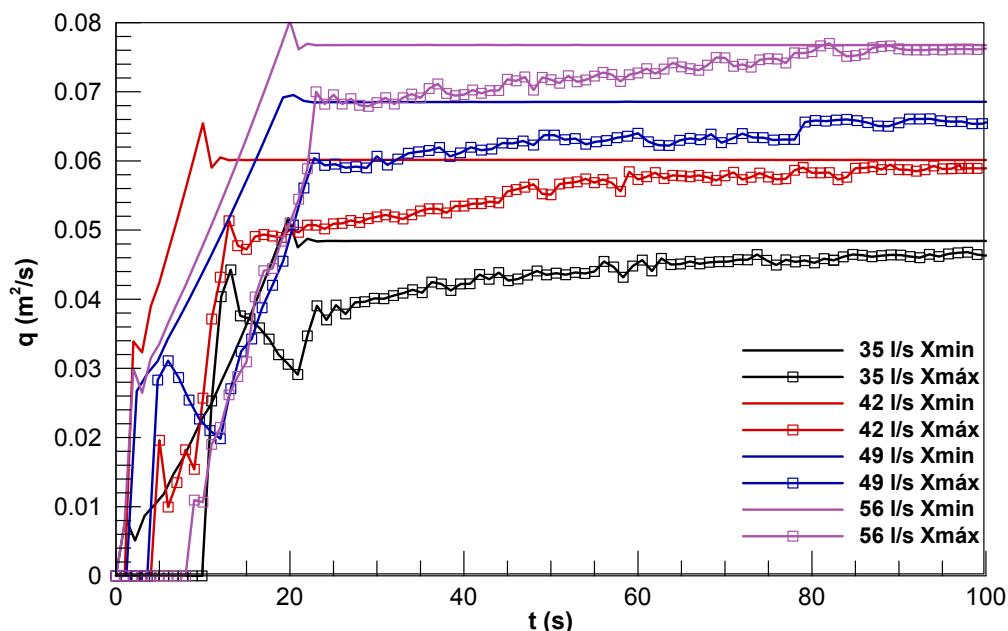


Figura 7.1: Evolução temporal do caudal nas fronteiras de montante e jusante.

Para verificar a satisfação da equação da conservação da massa em cada secção transversal, integraram-se numericamente as velocidades utilizando a regra dos trapézios. Na soleira, a média (em valor absoluto) das diferenças relativas entre os valores experimentais do caudal e os valores resultantes da integração numérica dos perfis foi de 2.5%, e no descarregador foi de 3.2%.

7.2 Soleira descarregadora

7.2.1 Alturas do escoamento

Na Fig. 7.2, apresentam-se as alturas do escoamento na soleira descarregadora obtidas numericamente em simulações realizadas com malha 4. As alturas experimentais, também representadas na Fig. 7.2, foram apenas medidas em 4 secções: secções 1, 2, 3 e 4, respetivamente a 12.5, 25.0, 37.5 e a 46.4 cm do início da soleira descarregadora. Verifica-se que as alturas do escoamento aumentam com o caudal, e para o mesmo caudal, vão diminuindo à medida que se aproximam do fim da soleira, analogamente ao observado por Cabrita (2007). Na Tabela 7.3, apresentam-se as diferenças relativas, δ , entre os resultados experimentais (h_{exp}) e os resultados numéricos (h_{num}). As maiores diferenças ocorrem na secção 4 (com excepção do caudal de 35 l/s), o que se poderá atribuir à estimativa imprecisa da altura do escoamento a partir da utilização do tubo de carga total.

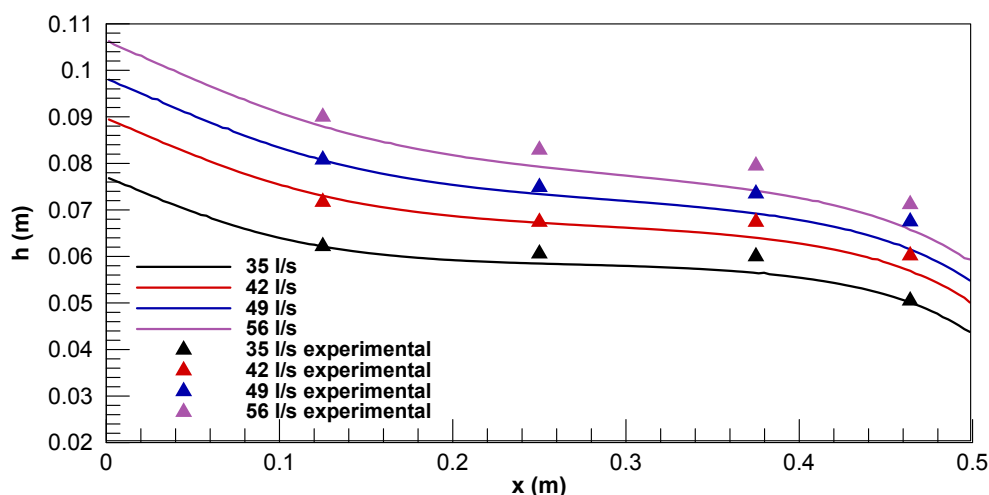


Figura 7.2: Alturas do escoamento na soleira: comparação entre resultados experimentais e numéricos.

Tabela 7.3: Diferenças relativas entre alturas do escoamento experimentais e numéricas: (a) $Q=35$ l/s e malha 4; (b) $Q=42$ l/s e malha 4; (c) $Q=49$ l/s e malha 4; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.

(a)				(b)			
x	h_{exp} (m)	h_{num} (m)	δ (%)	x	h_{exp} (m)	h_{num} (m)	δ (%)
Secção 1	0.0622	0.0621	-0.1	Secção 1	0.0717	0.0730	1.9
Secção 2	0.0606	0.0585	-3.5	Secção 2	0.0674	0.0672	-0.2
Secção 3	0.0600	0.0564	-5.9	Secção 3	0.0674	0.0640	-5.0
Secção 4	0.0505	0.0501	-0.9	Secção 4	0.0602	0.0569	-5.4

(c)				(d)			
x	h_{exp} (m)	h_{num} (m)	δ (%)	x	h_{exp} (m)	h_{num} (m)	δ (%)
Secção 1	0.0808	0.0807	-0.1	Secção 1	0.0900	0.0879	-2.3
Secção 2	0.0749	0.0734	-2.0	Secção 2	0.0829	0.0793	-4.4
Secção 3	0.0735	0.0692	-5.8	Secção 3	0.0795	0.0741	-6.8
Secção 4	0.0675	0.0615	-8.9	Secção 4	0.0712	0.0657	-7.7

A Fig. 7.3 apresenta as alturas do escoamento numéricas na soleira adimensionalizadas pelo comprimento desta (L soleira). Os perfis da superfície livre apresentados são análogos aos obtidos por Chanson e Felder (2012). Estes autores atribuem a acentuada curvatura da superfície livre no final da soleira à aceleração do escoamento na aproximação ao canal descarregador.

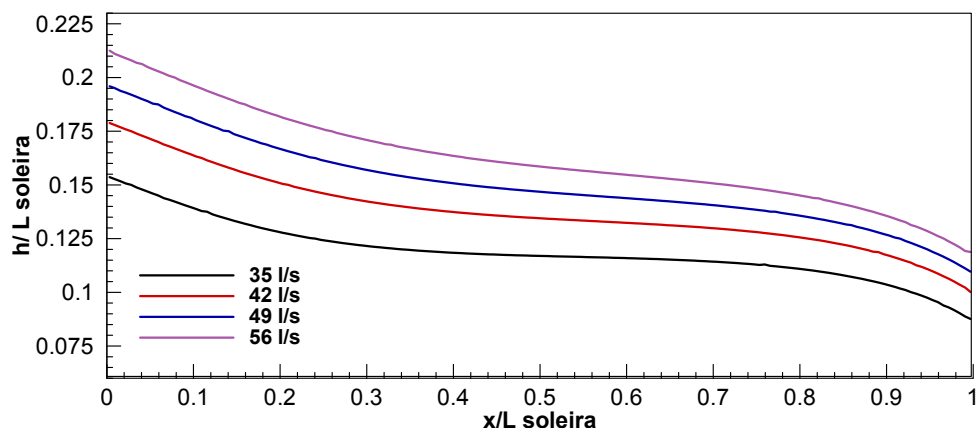


Figura 7.3: Alturas do escoamento na soleira adimensionalizadas pelo comprimento da soleira.

Na soleira, o regime de escoamento passa de lento a rápido. O regime crítico calculado com base na distribuição hidrostática de pressões situa-se, para os três maiores caudais estudados, entre as secções 1 e 2, tal como referido em Cabrita (2007). A Tabela 7.4 contém as diferenças relativas, δ , entre o número de Froude experimental, Fr_{exp} , e o numérico, Fr_{num} , em cada secção dos quatro caudais em estudo e malha 4.

Tabela 7.4: Diferenças relativas entre os números de Froude experimentais e numéricos: (a) $Q=35$ l/s e malha 4; (b) $Q=42$ l/s e malha 4; (c) $Q=49$ l/s e malha 4; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.

(a)				(b)			
x	Fr_{exp}	Fr_{num}	δ (%)	x	Fr_{exp}	Fr_{num}	δ (%)
Secção1	1.02	1.00	-2.0	Secção1	0.99	0.97	-1.7
Secção 2	1.07	1.09	2.2	Secção 2	1.09	1.10	1.0
Secção 3	1.08	1.15	6.8	Secção 3	1.09	1.19	8.8
Secção 4	1.40	1.38	-1.1	Secção 4	1.29	1.42	10.1

(c)				(d)			
x	Fr_{exp}	Fr_{num}	δ (%)	x	Fr_{exp}	Fr_{num}	δ (%)
Secção1	0.96	0.96	-0.4	Secção1	0.94	0.94	0.1
Secção 2	1.08	1.10	1.9	Secção 2	1.06	1.10	3.6
Secção 3	1.11	1.20	8.4	Secção 3	1.13	1.21	7.5
Secção 4	1.26	1.44	14.4	Secção 4	1.34	1.46	8.9

7.2.2 Perfis de velocidade do escoamento

Os perfis de velocidade das Figs. 7.4 e 7.5 foram obtidos numericamente. Analisando a Fig. 7.4, observa-se que, para cada caudal, a velocidade do escoamento aumenta de montante para jusante, sendo esta variação mais expressiva para os caudais mais elevados, analogamente ao observado

em Cabrita (2007). A acentuada curvatura dos perfis de velocidade numéricos correspondentes à secção 4 resulta da aceleração do escoamento na aproximação ao canal descarregador, analogamente ao verificado por Felder e Chanson (2012). Na Fig. 7.5, observa-se que para a mesma secção, a velocidade do escoamento aumenta com o caudal, sendo essa variação mais expressiva no trecho de jusante (secções 3 e 4).

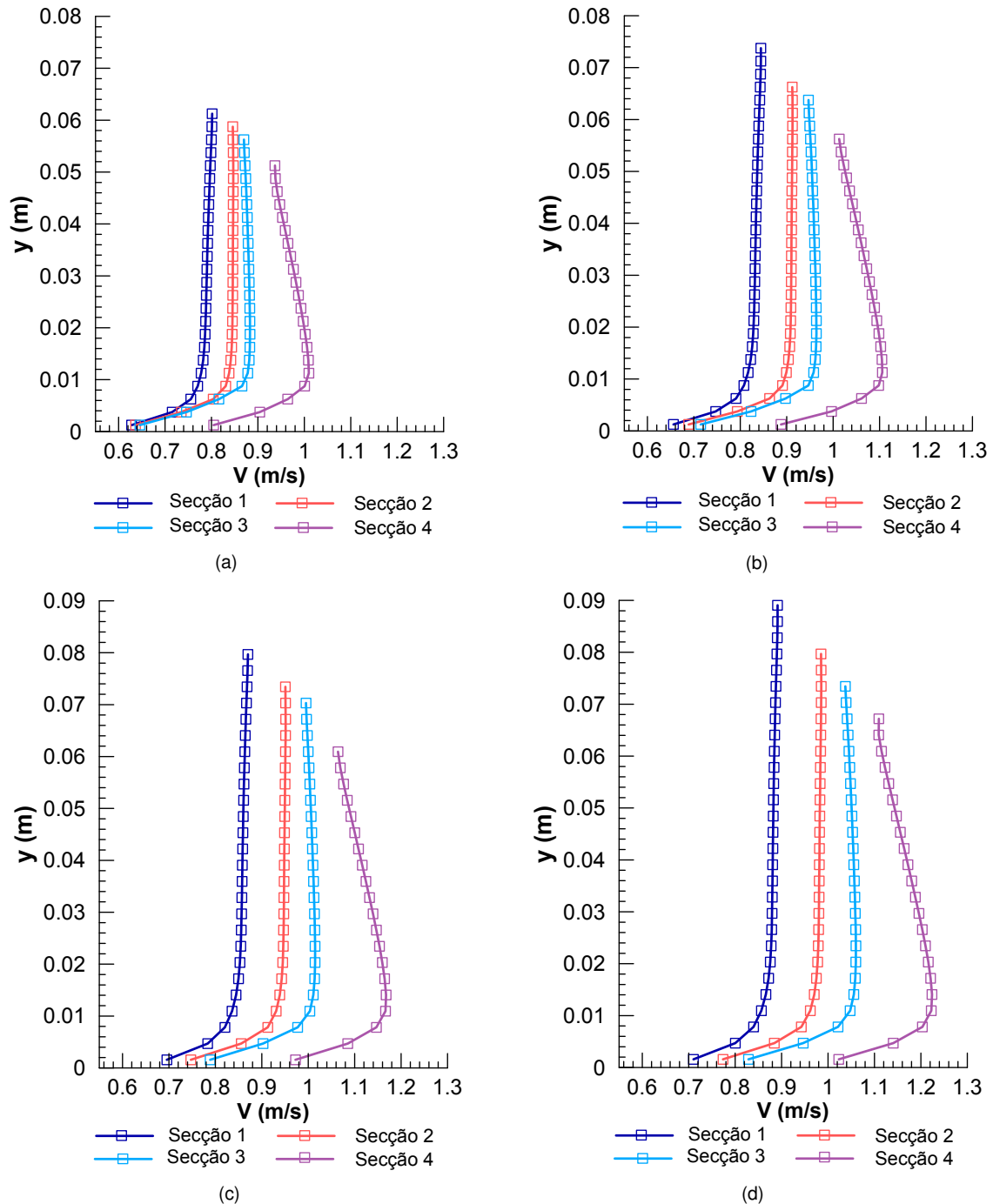


Figura 7.4: Perfis de velocidade do escoamento na soleira: (a) $Q=35$ l/s e malha 4; (b) $Q=42$ l/s e malha 4; (c) $Q=49$ l/s e malha 4; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.

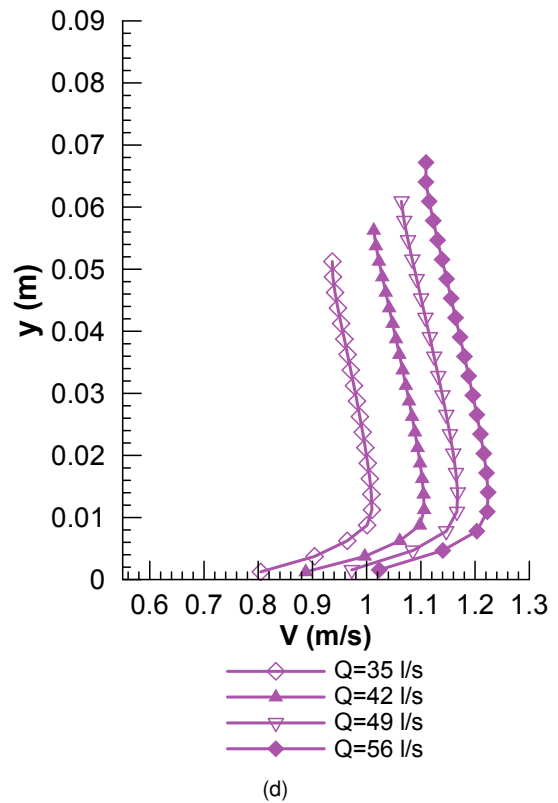
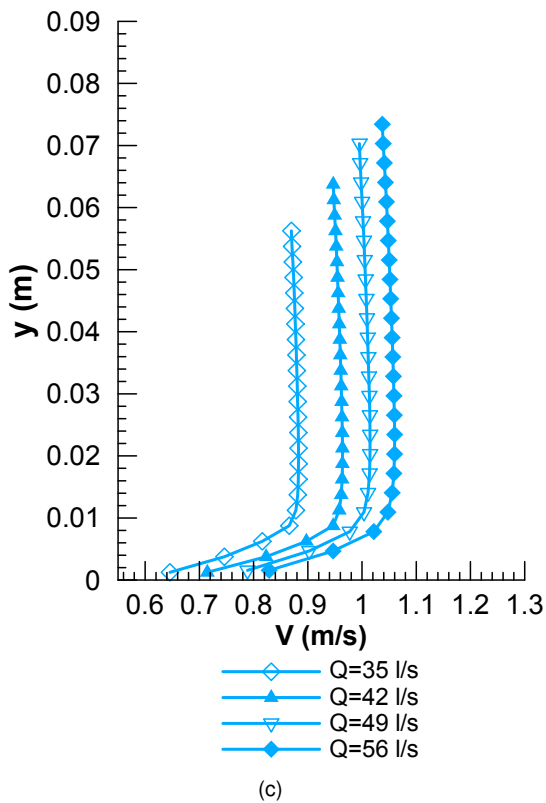
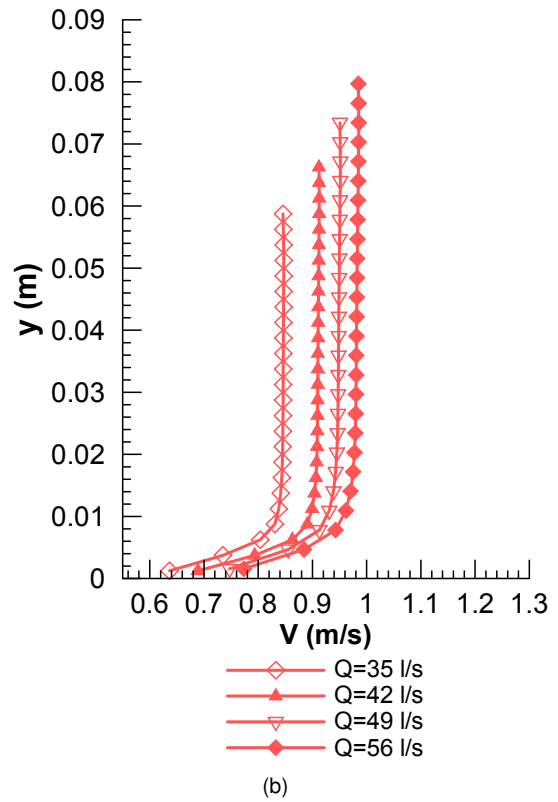
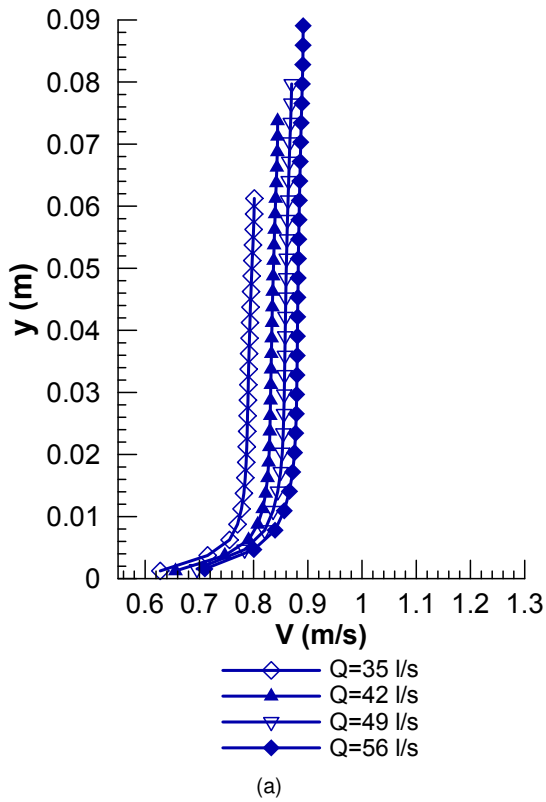


Figura 7.5: Perfis de velocidade na soleira: (a) seção 1; (b) seção 2; (c) seção 3; (d) seção 4.

Compararam-se os perfis de velocidade medidos experimentalmente e os obtidos numericamente, tendo sido calculadas as diferenças relativas médias (em valor absoluto) entre esses perfis. Para $Q=35$ l/s, a diferença relativa média na secção 1 é 7.5%, na secção 2 é 5.9%, na secção 3 é 3.2% e na secção 4 é 2.6%. Para $Q=42$ l/s, a diferença relativa média na secção 1 é 10.2%, na secção 2 é 7.0%, na secção 3 é 3.3% e na secção 4 é 4.7%. Os perfis correspondentes a estes dois caudais encontram-se no Anexo F. Para $Q=49$ l/s, a diferença relativa média na secção 1 é 6.3%, na secção 2 é 5.3%, na secção 3 é 2.6% e na secção 4 é 7.3%. Para $Q=56$ l/s, a diferença relativa média na secção 1 é de 5.1%, na secção 2 é 4.4%, na secção 3 é de 2.8% e na secção 4 é de 8.6%. Os perfis correspondentes a estes dois caudais são apresentados nas Figs. 7.6 e 7.7 .

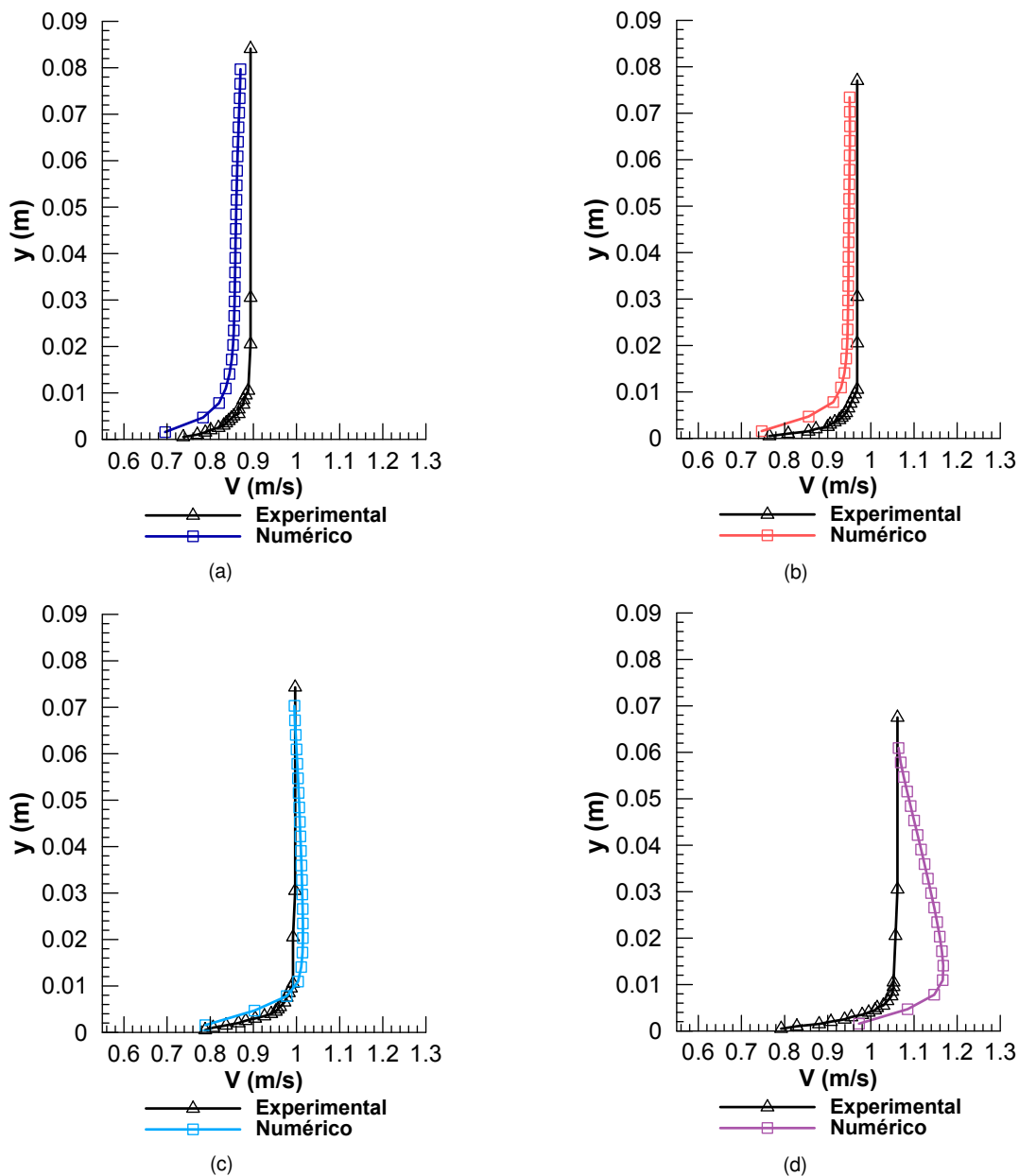


Figura 7.6: Perfis de velocidade experimentais e numéricos na soleira para $Q=49$ l/s e malha 4: (a) secção 1; (b) secção 2; (c) secção 3; (d) secção 4.

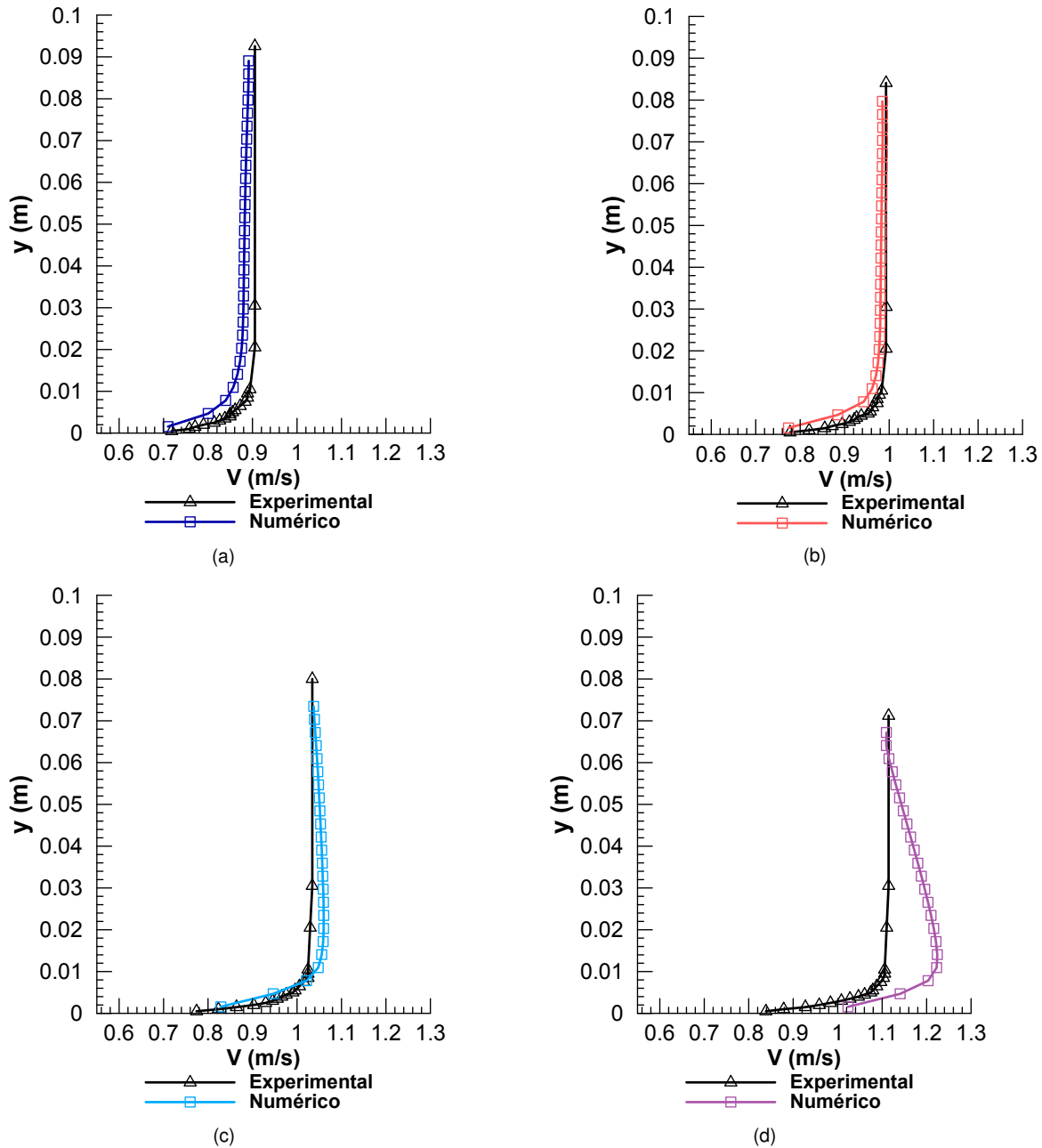


Figura 7.7: Perfis de velocidade experimentais e numéricos para $Q=56$ l/s e malha 4: (a) secção 1; (b) secção 2; (c) secção 3; (d) secção 4.

Os resultados obtidos numericamente aproximam-se dos resultados medidos experimentalmente, especialmente nas secções 2 e 3 onde a curvatura do escoamento é pequena. Os perfis experimentais da secção 4 não reproduzem a acentuada curvatura dos perfis numéricos, pois a hipótese da distribuição hidrostática de pressões, em que se baseou o cálculo das velocidades, não é válida nesta secção, onde o escoamento é rapidamente variado. Acresce que o tubo de carga total não estava, nessa secção, alinhado com a direção do escoamento, o que poderá justificar, em parte, as diferenças obtidas.

7.3 Canal descarregador em degraus

7.3.1 Alturas do escoamento

O perfil ondulado da superfície livre do escoamento no canal descarregador reflete a macro rugosidade gerada pelos degraus. Julga-se que a sobrelevação da superfície livre imediatamente a jusante da extremidade de cada degrau resulta da deflexão das linhas de corrente do escoamento deslizante ao encontrar o vórtice principal de recirculação e do consequente impacto do jato interno no patamar horizontal do degrau (Fig. 7.8).

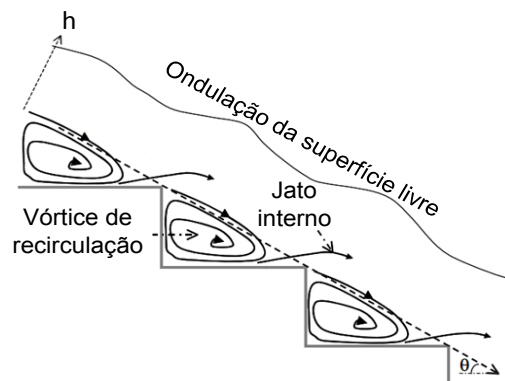


Figura 7.8: Esquema ilustrativo da ondulação da superfície livre nos degraus (adaptado de André, 2004).

A Fig. 7.9 apresenta a cavidade do 7.º degrau, em que se verifica ar emulsionado no núcleo do vórtice de recirculação. A Fig. 7.10 apresenta uma imagem mais detalhada do núcleo do vórtice de recirculação.

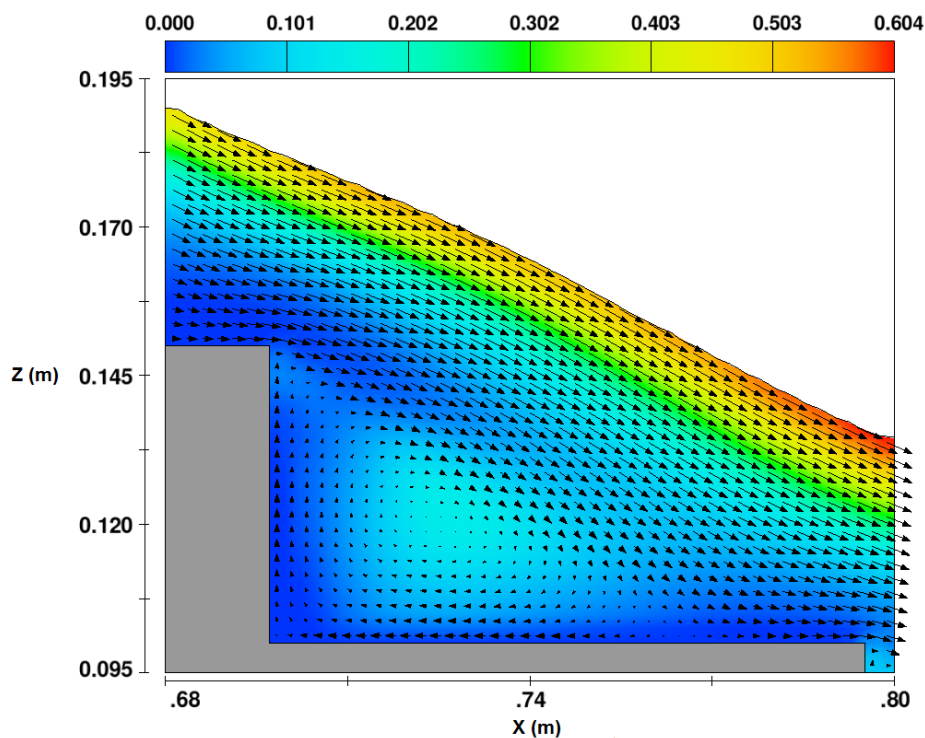


Figura 7.9: Campo de concentração de ar e linhas de corrente do escoamento no 7.º degrau.

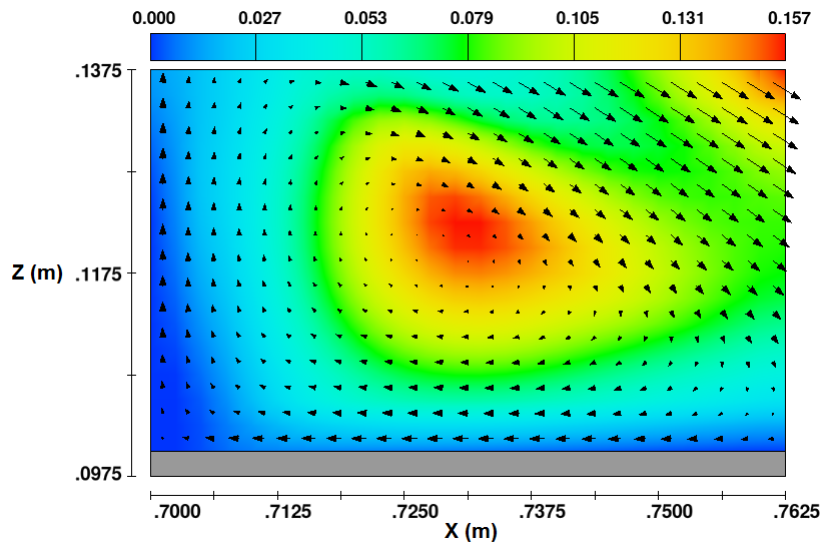
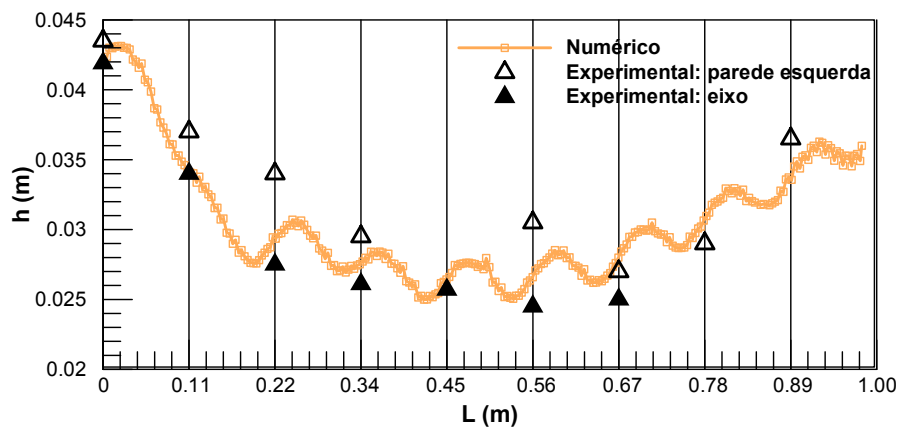


Figura 7.10: Campo de concentração de ar e linhas de corrente do escoamento no núcleo do vórtice de recirculação no 7.º degrau

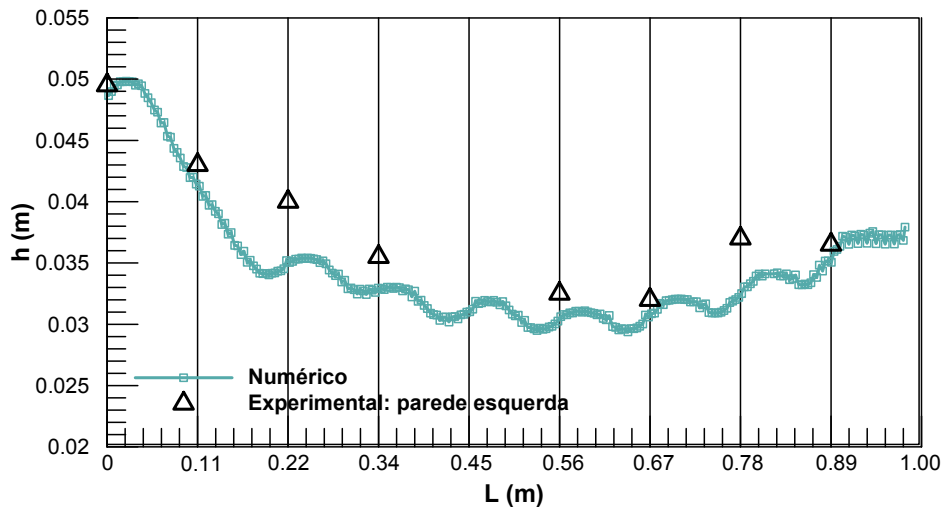
Na Fig. 7.11, representam-se, para cada caudal, as alturas do escoamento obtidas experimental e numericamente. Verifica-se que os resultados numéricos conseguem reproduzir a ondulação da superfície livre. Os valores experimentais das alturas do escoamento medidas no eixo do descarregador apenas se encontram disponíveis para $Q=35$ l/s. Para os restantes caudais, apresentam-se apenas as alturas medidas na parede esquerda do descarregador. Não se incluíram, nos valores experimentais, os valores referentes à vertical 5 devido a uma anomalia verificada na medição da altura de água nesta vertical.

Na Tabela 7.5, apresentam-se as diferenças relativas entre as alturas do escoamento experimentais e numéricas para os quatro caudais em estudo. A diferença δ_1 refere-se à diferença relativa entre a altura do escoamento medida no eixo do descarregador, h_{eixo} , e a altura obtida numericamente, h_{num} , e a diferença δ_2 refere-se à diferença relativa entre a altura do escoamento medida na parede esquerda, $h_{\text{parede esquerda}}$, e a altura obtida numericamente, h_{num} . As diferenças δ_2 são negativas, como seria de esperar, devido ao empolamento do escoamento junto das paredes laterais do descarregador.

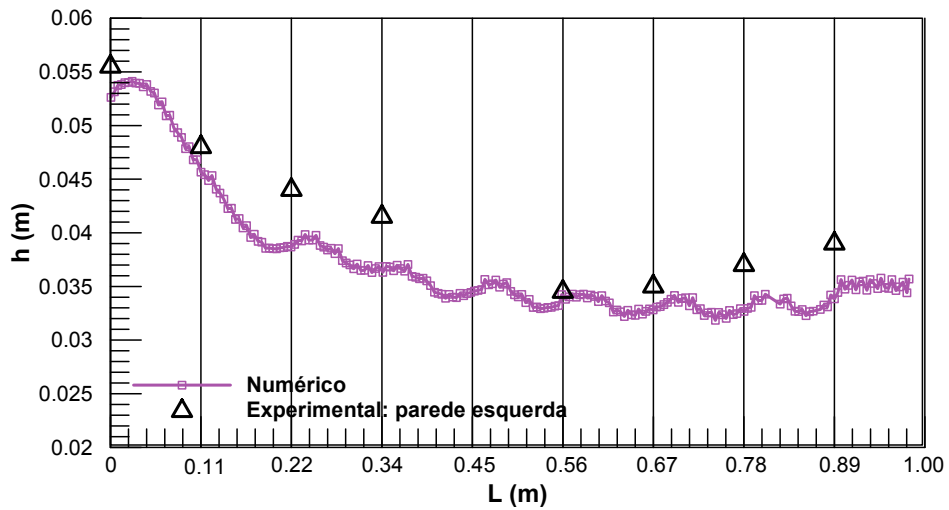


(a)

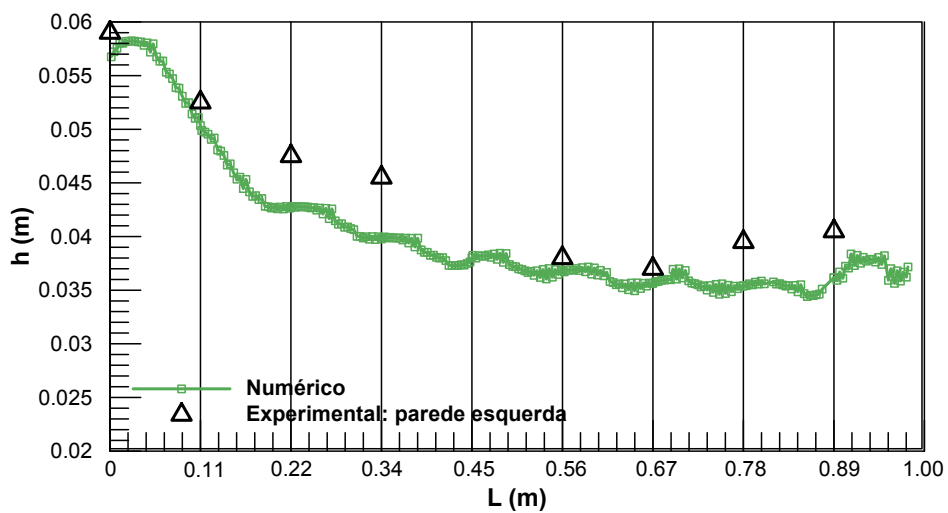
Figura 7.11: Alturas do escoamento no canal descarregador em degraus: (a) $Q=35$ l/s e malha 5; (b) $Q=42$ l/s e malha 5; (c) $Q=49$ l/s e malha 5; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.



(b)



(c)



(d)

Figura 7.11: Alturas do escoamento no canal descarregador em degraus: (a) $Q=35$ l/s e malha 5; (b) $Q=42$ l/s e malha 5; (c) $Q=49$ l/s e malha 5; (d) $Q=56$ l/s e malha 4 (continuação).

Tabela 7.5: Diferenças relativas entre as alturas do escoamento experimentais e numéricas: (a) Q=35 l/s; (b) Q=42 l/s; (c) Q=49 l/s; (d) Q=56 l/s.

(a)

Vertical	L (m)	h _{eixo} (m)	h _{parede esquerda} (m)	h _{num} (m)	δ_1 (%)	δ_2 (%)
1	0.00	0.042	0.044	0.042	0.5	-3.2
2	0.11	0.034	0.037	0.034	0.4	-7.7
3	0.22	0.028	0.034	0.029	6.8	-13.6
4	0.34	0.026	0.030	0.028	5.7	-6.5
5	0.45	0.026	-	0.026	2.9	-
6	0.56	0.025	0.031	0.027	8.6	-12.8
7	0.67	0.025	0.027	0.028	12.2	3.9
8	0.78	-	0.029	0.031	-	6.1
9	0.89	-	0.037	0.034	-	-7.9

(b)

Vertical	L (m)	h _{parede esquerda} (m)	h _{num} (m)	δ_2 (%)
1	0.00	0.0495	0.049	-1.7
2	0.11	0.0430	0.041	-3.8
3	0.22	0.0400	0.035	-12.2
4	0.34	0.0355	0.033	-7.2
5	0.45	-	-	-
6	0.56	0.0325	0.030	-6.3
7	0.67	0.0320	0.031	-4.0
8	0.78	0.0370	0.032	-12.5
9	0.89	0.0370	0.035	-3.9

(c)

Vertical	L (m)	h _{parede esquerda} (m)	h _{num} (m)	δ_2 (%)
1	0.00	0.0555	0.053	-5.2
2	0.11	0.0480	0.046	-4.9
3	0.22	0.0440	0.039	-12.0
4	0.34	0.0415	0.036	-12.2
5	0.45	-	-	-
6	0.56	0.0345	0.034	-1.1
7	0.67	0.0350	0.033	-6.2
8	0.78	0.0370	0.033	-11.6
9	0.89	0.0390	0.034	-13.2

(d)

Vertical	L (m)	h _{parede esquerda} (m)	h _{num} (m)	δ_2 (%)
1	0.00	0.0590	0.057	-3.8
2	0.11	0.0525	0.050	-4.1
3	0.22	0.0475	0.043	-10.1
4	0.34	0.0455	0.040	-12.5
5	0.45	-	-	-
6	0.56	0.0380	0.037	-3.1
7	0.67	0.0370	0.036	-3.7
8	0.78	0.0395	0.035	-10.4
9	0.89	0.0405	0.036	-10.7

Na Fig. 7.12, estão representadas as alturas do escoamento obtidas numericamente para os quatro caudais em estudo. Verifica-se que as alturas aumentam com o caudal, e que a amplitude da ondulação diminui com o caudal, analogamente ao observado em André (2004). O degrau em que, para cada caudal, se verifica a elevação da altura do escoamento (por exemplo, 6.º degrau para $Q=35$ l/s e 7.º degrau para $Q=49$ l/s), corresponde ao degrau em que se começa a verificar a entrada de ar no escoamento, como se pode observar por comparação entre a Fig. 7.12 e o Anexo G. Com base nos resultados expostos na Fig. 7.12 e no Anexo G, é possível afirmar que o FLOW-3D® reconhece que com o aumento do caudal há uma diminuição na quantidade de ar que entra no sistema e um deslocamento para jusante da secção da entrada de ar, o que seria expectável.

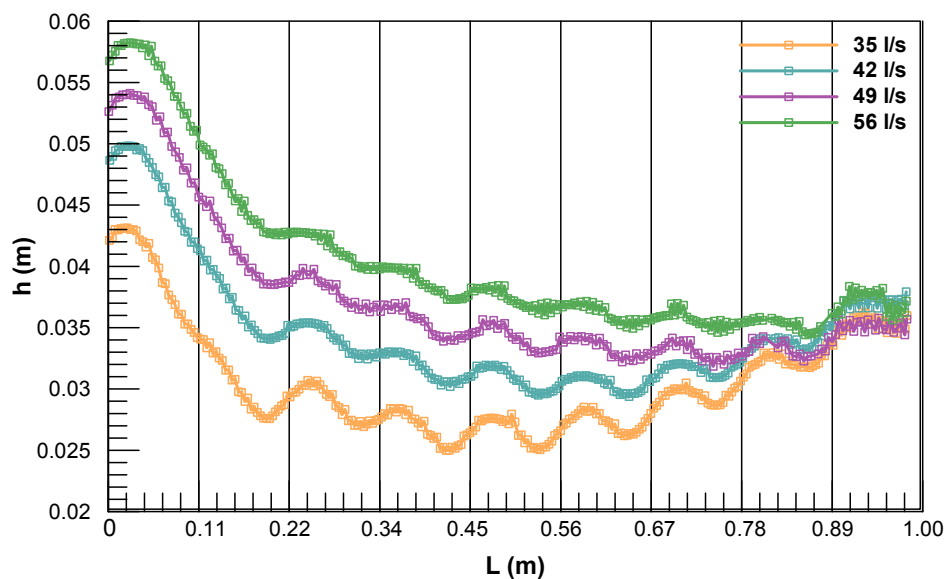
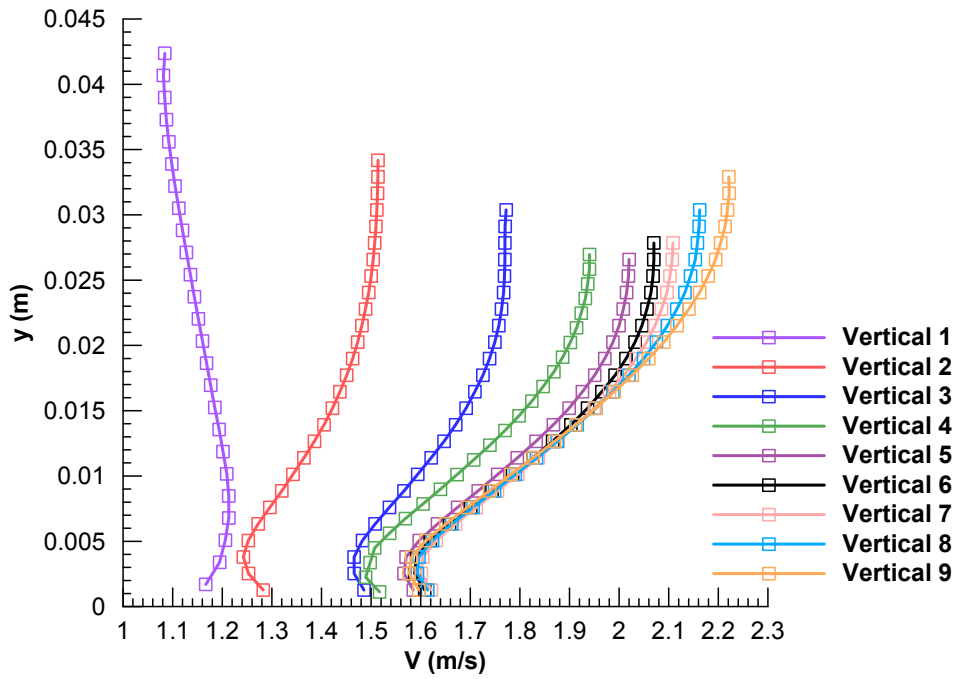


Figura 7.12: Alturas do escoamento obtidas numericamente para os caudais em estudo.

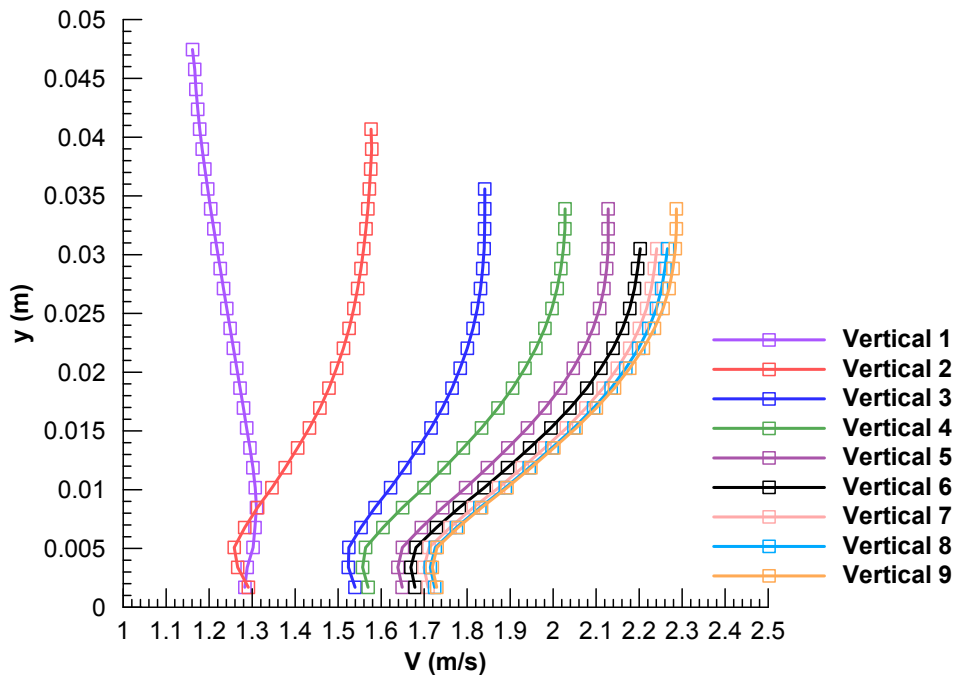
7.3.2 Perfis de velocidade do escoamento

Na Fig. 7.13 apresentam-se os perfis de velocidade obtidos numericamente em nove verticais do descarregador para os quatro caudais em estudo. Constata-se que as velocidades aumentam com o caudal e que a velocidade aumenta, para cada caudal, ao longo do descarregador, o que seria expectável. Contudo, nas verticais 3 a 9, os valores da velocidade do escoamento nos pontos mais próximos da soleira fictícia são ligeiramente superiores aos estimados nos pontos imediatamente acima na mesma vertical, o que poderá não traduzir corretamente o fenómeno, em resultado da interpolação efetuada pelo FLOW-3D® para estimar a velocidade nas diversas normais à soleira e do maior gradiente de velocidades nessa zona. Por outro lado, os perfis de velocidade do escoamento no trecho de jusante do descarregador são próximos, o que seria de esperar com o aproximar do escoamento uniforme.

A acentuada curvatura do perfil de velocidades da vertical 1 deve-se à aceleração do escoamento no início do canal descarregador.

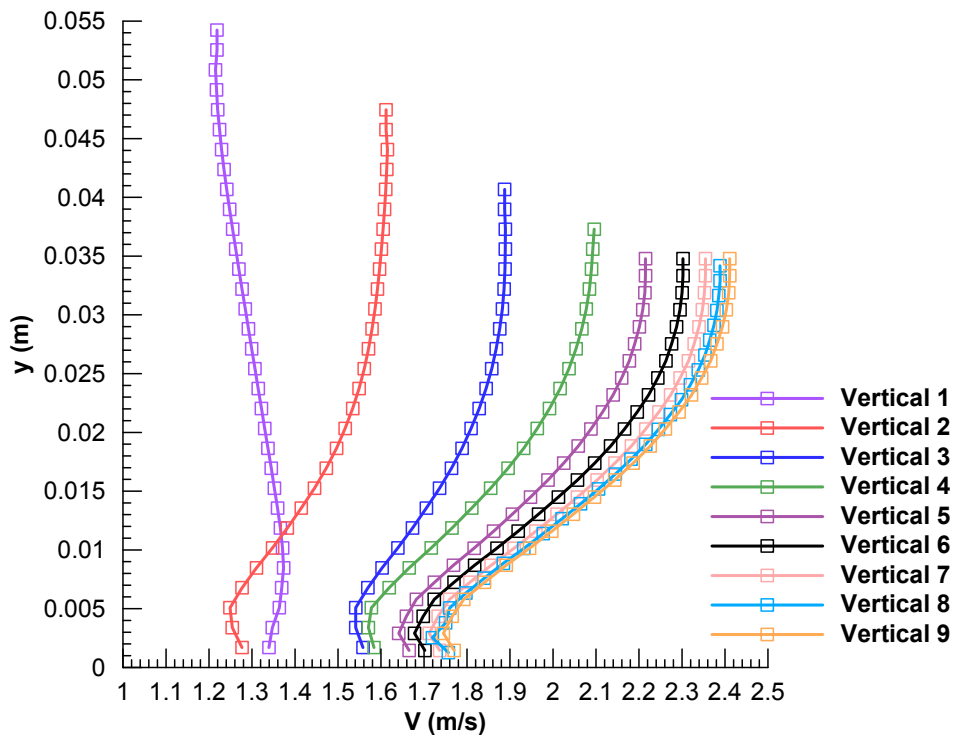


(a)

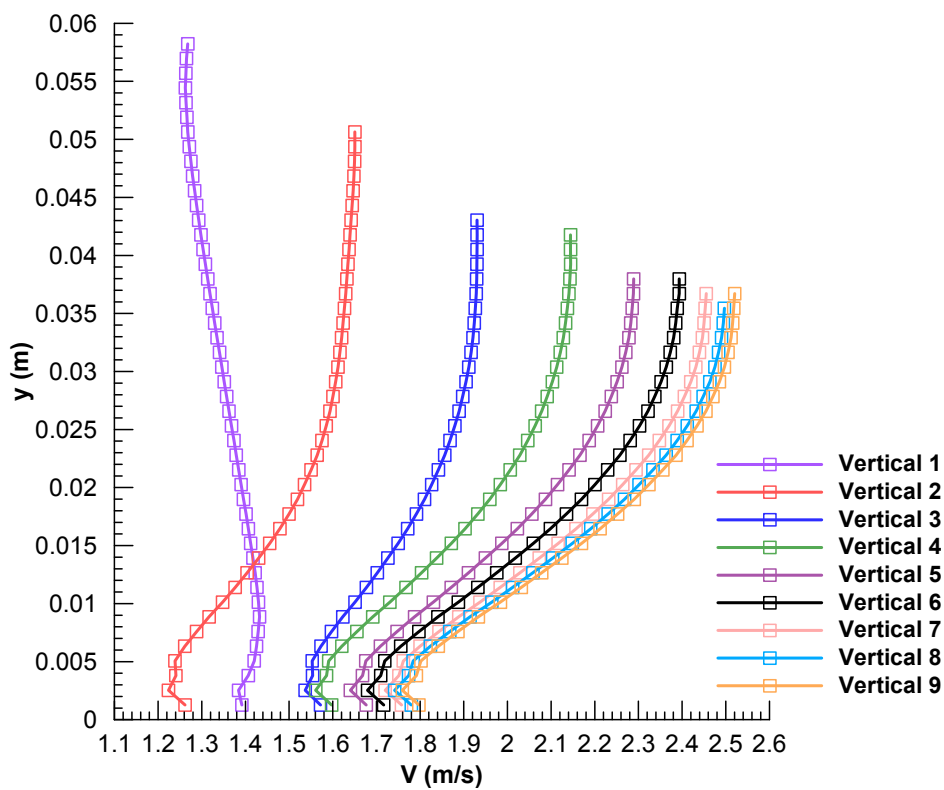


(b)

Figura 7.13: Perfis de velocidade no canal descarregador em degraus: (a) $Q=35$ l/s e malha 5; (b) $Q=42$ l/s e malha 5; (c) $Q=49$ l/s e malha 5; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.



(c)



(d)

Figura 7.13: Perfis de velocidade no canal descarregador em degraus: (a) $Q=35$ l/s e malha 5; (b) $Q=42$ l/s e malha 5; (c) $Q=49$ l/s e malha 5; (d) $Q=56$ l/s e malha 4 (continuação).

Compararam-se os perfis de velocidade experimentais e numéricos em algumas verticais do canal descarregador e calcularam-se as respectivas diferenças relativas médias (em valor absoluto). Apenas foram medidas, experimentalmente, velocidades para os caudais de 35 e 42 l/s. A comparação para $Q=35$ l/s encontra-se no Anexo H e as diferenças relativas médias são de 10.5%, 14.8%, 13.4%, 18.4%, 12.2% e 14.3% nas verticais 2, 3, 4, 5, 6, e 7, respetivamente. A comparação para $Q= 42$ l/s pode ser observada na Fig. 7.14 e as diferenças relativas médias são de 7.8%, 14.5%, 12.8%, 20.0%, 16.7% e 14.0% nas verticais 2, 3, 4, 5, 6, e 7, respetivamente.

As diferenças relativas são, em geral, consideráveis. A análise dos valores do caudal unitário obtidos a partir da integração dos perfis de velocidade experimentais e sua posterior comparação com os valores adotados nos ensaios experimentais, sugere que a velocidade do escoamento obtida por meio do tubo de Pitot tenha sido, em geral, sobrestimada, analogamente ao referido em André e Ramos (2003). Julga-se que tal poderá ser explicado, em parte, pela curvatura das linhas de corrente nas verticais de medição, conduzindo necessariamente a um deficiente alinhamento do tubo de Pitot em relação à direção do escoamento, assim como pela flutuação da superfície livre, em particular no trecho mais próximo da secção de afloramento da camada limite.

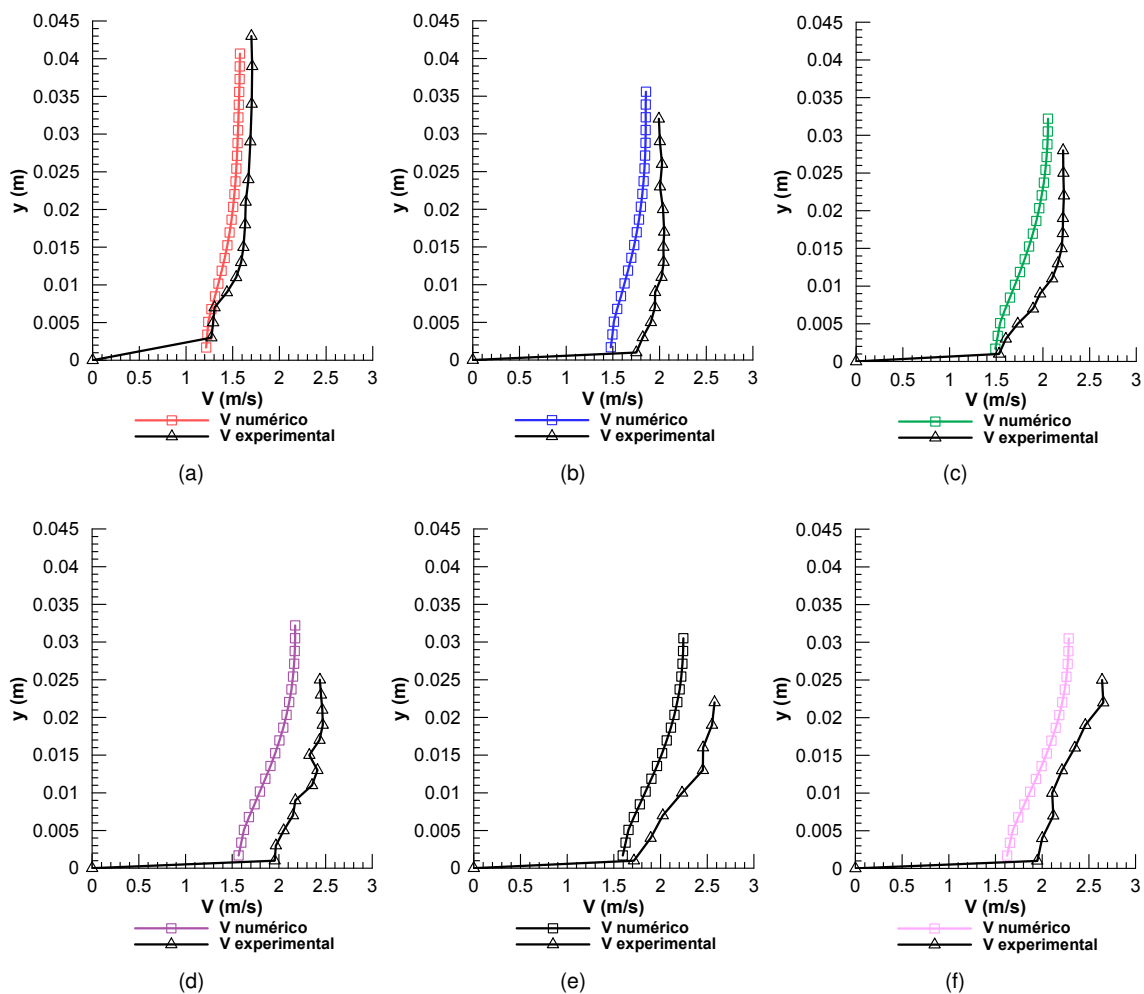


Figura 7.14: Comparação entre perfis de velocidade experimentais e numéricos no canal descarregador para $Q=42$ l/s e malha 5: (a) vertical 2; (b) vertical 3; (c) vertical 4; (d) vertical 5; (e) vertical 6; (f) vertical 7.

Capítulo 8

Conclusões. Desenvolvimentos futuros

8.1 Conclusões

Em geral, o escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus de barragens de grande e média dimensão compreende um trecho com forte emulsão de ar, sendo a dissipação de energia significativa, comparativamente à que se verifica em descarregadores de cheias com paramento convencional, para idêntico declive e caudal unitário. No entanto, a região não-arejada do escoamento reveste-se de assinalável importância em descarregadores de cheias em degraus de pequenas barragens, em particular para caudais unitários relativamente elevados.

Na presente dissertação apresenta-se um estudo numérico centrado na região não-arejada do escoamento deslizante sobre turbilhões, num descarregador em degraus com declive de 1V:2H, típico do paramento de jusante de uma pequena barragem de aterro.

Os resultados evidenciam que o *software* de CFD FLOW-3D® reproduz adequadamente as principais grandezas características da região não-arejada do escoamento. Os resultados computacionais relativos ao caudal, alturas do escoamento e campo de velocidades foram comparados com os resultados experimentais correspondentes.

Na soleira descarregadora, a média (em valor absoluto) das diferenças relativas entre os valores do caudal obtidos experimentalmente e os resultantes da integração numérica dos perfis de velocidade do escoamento, utilizando a regra dos trapézios, foi de 2.5%. O andamento qualitativo dos perfis da superfície livre correspondentes aos vários caudais é adequadamente reproduzido, sendo os valores máximo e médio (absolutos) das diferenças relativas da altura do escoamento obtida por via experimental e numérica iguais a 8.9% e a 3.8%, respetivamente. No que respeita à velocidade do escoamento, obtiveram-se diferenças relativas (em valor absoluto) inferiores a 10.2%, e, em média, de 5.4%.

No canal descarregador, a média (em valor absoluto) das diferenças relativas entre os valores experimentais do caudal e os valores resultantes da integração numérica dos perfis de velocidade (utilizando a regra dos trapézios) foi de 3.2%. Verificou-se que as simulações reproduzem adequadamente o perfil

ondulado da superfície livre do escoamento no canal descarregador em degraus, sendo esta ondulação mais expressiva para os menores caudais. As diferenças relativas (em valor absoluto) entre os valores numéricos e experimentais relativos à altura do escoamento foram inferiores a 13.6%, e, em média, iguais a 7.4%. Relativamente à velocidade do escoamento, obtiveram-se diferenças relativas (em valor absoluto) inferiores a 20.0%, e, em média, de 14.3%.

As análises de sensibilidade realizadas no decurso da calibração do modelo numérico foram essenciais para assegurar a fiabilidade dos resultados obtidos. O estudo de independência da malha revelou que, na soleira descarregadora e na região não-arejada do escoamento (em que o FLOW-3D® não prevê entrada de ar), as soluções correspondentes às duas malhas mais refinadas convergiram, tendo sido obtida uma solução independente da malha. As soluções correspondentes às duas malhas mais refinadas vão-se afastando à medida que se aproximam da região arejada do escoamento, embora de forma não significativa.

Computacionalmente, a caracterização quantitativa do desenvolvimento da camada limite e da região arejada do escoamento constitui um desafio. Os resultados permitiram concluir que os valores relativos à entrada de ar obtidos com o FLOW-3D® são muito dependentes da dimensão da malha, do valor do coeficiente de tensão superficial e de algumas outras opções numéricas, pelo que não podem ser considerados rigorosos. Neste estudo, apenas se avaliou qualitativamente a secção de entrada de ar no escoamento. Verificou-se que o anulamento do coeficiente de tensão superficial favorece a entrada de ar no sistema, sem afetar os resultados na região não-arejada do escoamento.

Algumas diferenças mais expressivas entre os resultados numéricos e os experimentais podem ser explicadas pela impossibilidade de reproduzir a natureza tridimensional do escoamento turbulento em simulações 2D. Com efeito, a evolução da vorticidade em 2D é diferente da evolução da vorticidade em 3D, nomeadamente porque os mecanismos de dissipação de energia dos turbilhões não são adequadamente representados em 2D (Bombardelli et al., 2009). Este facto pode ter afetado, por exemplo, os valores da energia cinética turbulenta e, conseqüentemente, os resultados relativos à entrada de ar, o que levou à necessidade de anular o coeficiente de tensão superficial para permitir a ocorrência de entrada de ar no descarregador. É também importante assinalar que o software utilizado se baseia nas equações médias de Reynolds, que sendo suficientes para a caracterização das variáveis em estudo, constituem uma aproximação e simplificação da realidade.

Os resultados obtidos indicam que os modelos numéricos podem simular adequadamente o escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores em degraus, em particular no trecho sem emulsão de ar, podendo constituir uma ferramenta útil na prática da engenharia. Estes modelos podem ser utilizados como complemento aos estudos experimentais e analíticos, permitindo uma redução do tempo e custo investidos no projeto de estruturas deste tipo.

8.2 Desenvolvimentos futuros

Na presente investigação pretendeu-se dar um contributo para a modelação CFD do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias, em particular a montante da secção de afloramento da camada limite. No entanto, existem ainda tópicos que se afiguram de interesse para o prosseguimento da investigação:

- aprofundamento do estudo numérico para um conjunto mais alargado de dados experimentais obtidos por André e Ramos (2003) e Cabrita (2007), nomeadamente diferente altura dos degraus, permitindo alargar a gama de valores da altura crítica adimensionalizada pela altura dos degraus;
- caracterização numérica do desenvolvimento da camada limite na soleira descarregadora e no canal descarregador em degraus;
- estudo comparativo entre simulações 2D e 3D;
- estudo da dissipação de energia no canal descarregador em degraus;
- análise do emulsionamento de ar a jusante da secção de afloramento da camada limite, mediante comparação com resultados experimentais obtidos por outros investigadores, para descarregadores com declive idêntico ao analisado no presente estudo;
- estudo numérico 3D do escoamento no descarregador com paredes convergentes, e comparação com os resultados experimentais obtidos por André e Ramos (2003) e Cabrita (2007).

Bibliografia

- André, M. e Ramos, P. (2003). Hidráulica de descarregadores de cheia em degraus e aplicação a descarregadores com paredes convergentes. Trabalho final de curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- André, S. (2004). High Velocity Aerated Flows on Stepped Chutes with Macro-Roughness Elements. Tese de Doutoramento, EPFL, Lausanne, Suíça.
- ANSYS (2009). ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. ANSYS, Inc.
- Arantes, E. J. (2007). Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD. Tese de doutoramento, Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Bakker, A. (2002). Lecture 9-Kolmogorov's Theory. Fluent Inc.
- Boes, R. M. e Hager, W. H. (2003). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9):661–670.
- Bombardelli, F. (2012). Computational multi-phase fluid dynamics to address flows past hydraulic structures. 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 Fevereiro 2012, Porto, Portugal.
- Bombardelli, F. A., Cantero, M. I., Garcia, M. H., e Buscaglia, G. C. (2009). Numerical aspects of the simulation of discontinuous saline under flows: the lock-exchange problem. *Journal of Hydraulic Research*, 47(6):777–789.
- Bombardelli, F. A., Meireles, I., e Matos, J. (2010). Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(4):263–288.
- Brederode, V. (2014). Fundamentos da aerodinâmica incompressível. IST Press.
- Burnham, J. (2011a). Introduction to FLOW-3D for Hydraulics. Versão 10.0, Santa Fe, New Mexico, EUA.
- Burnham, J. (2011b). Modeling dams with computational fluid dynamics: past success and new directions. Dam Safety 2011, National Harbor MD, Setembro, 25-29.

- Cabrita, J. (2007). Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus com paredes convergentes. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Carvalho, R. e Martins, R. (2009). Stepped Spillway with Hydraulic Jumps: Application of a Numerical Model to a Scale Model of a Conceptual Prototype. *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000042, pp. 615-619.
- Carvalho, R. F. e Amador, A. T. (2008). Physical and numerical investigation of the skimming flow over a stepped spillway. Proc. 3rd IAHR Int. Symposium on Hydraulic Structures, Nanjing, China, pp. 1767-1772.
- Celik, I. (1999). Introductory turbulence modeling. West Virginia University.
- CFD Online (2015). CFD Online Website. <http://www.cfd-online.com/>.
- Chanson, H. (1994). Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways. Pergamon, Oxford, Reino Unido.
- Chanson, H. (2000). Hubert Chanson website. <http://staff.civil.uq.edu.au/h.chanson/>.
- Chanson, H. (2002). The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways. Balkema, Holanda.
- Cheng, X., Chen, Y., e Luo, L. (2006). Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillway. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 49(6):674–684.
- Cheng, X., Gulliver, J. S., e Zhu, D. (2014). Application of displacement height and surface roughness length to determination boundary layer development length over stepped spillway. *Water* 2014, (6):3888–3912.
- Cheng, X. J. e Gulliver, J. S. (2011). Velocity profile for developing flow over stepped spillway. AIP Conference Proceedings.
- Diez-Cascon, J., Blanco, J. L., Revilla, J., e Garcia, R. (1991). Studies on the hydraulic behaviour of stepped spillways. *Water Power and Dam Construction*, Setembro, pp. 22-26.
- Eça, L. (2008). Cálculo de parâmetros integrais de camada limite em gradiente de pressão nulo. Instituto Superior Técnico.
- Eça, L. (2015). Escoamento em regime turbulento. Texto de apoio às aulas da UC de Aerodinâmica, Instituto Superior Técnico.
- Elviro, V. e Mateos, C. (1995). Spanish research into stepped spillways. *The International Journal on Hydropower and Dams*, Setembro, pp. 61-65.
- Essery, I. T. S. e Horner, M. W. (1978). The Hydraulic Design of Stepped Spillways. CIRIA Report no. 33, Londres, Reino Unido.
- Fael, C. (2000). Escoamento em quedas sucessivas: ocorrência e dissipação de energia. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- Felder, S. e Chanson, H. (2009). Turbulence, dynamic similarity and scale effects in high-velocity free-surface flows above a stepped chute. *Experiments in Fluids*, 47:1–18.
- Felder, S. e Chanson, H. (2012). Velocity and pressure measurements on a broad-crested weir: physical measurements. 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 Fevereiro, Porto, Portugal.
- Ferziger, J. H. e Peric, M. (1997). Computational methods for fluid dynamics. Springer.
- Flow Science, Inc. (2013). Hydraulic Training on FLOW-3D Version 10.1. Exercise 6: Air Entrainment.
- Flow Science, Inc. (2014). FLOW-3D User Manual. Versão 11.0.3, Santa Fe, New Mexico, EUA.
- Flow Science, Inc. (2015). FLOW-3D Website. www.flow3d.com.
- Fluent (2006). Fluent 6.3 user's guide. Fluent, Inc.
- Frei, W. (2013). Which turbulence model should i use for my CFD application? COMSOL Blog, <http://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>.
- Gobbi, M., Dias, N. L., Mascarenhas, F., e Valentine, E. (2015). Introdução à mecânica dos fluidos e aos fenómenos de transporte. Textos de apoio às aulas da UC de Mecânica dos Fluidos e da UC de Fenómenos de Transporte, Universidade Federal do Paraná.
- Hirsch, C. (2007). Numerical computation of internal and external flows. Elsevier.
- Hirt, C. W. (2003). Modeling turbulent entrainment of air at a free surface. Flow Science, Inc., Technical Note 61 FSI-03-TN61.
- Hirt, C. W. e Nichols, B. D. (1981). Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39:201–225.
- Hirt, C. W. e Sicilian, J. M. (1985). A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes. Flow Science, Inc., Los Alamos, New Mexico, EUA.
- Hunt, S. L. e Kadavy, K. C. (2013). Inception point for embankment dam stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(9):796–802.
- Jiyuan, Yeoh, G.-H., e Liu, C. (2008). *Computational Fluid Dynamics: A Pratical Approach*. Elsevier, 2nd edition.
- Johnson, M. C. e Savage, B. (2006). Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(12):1353–1357.
- Kositgittwong, D. (2012). Validation on numerical model of the flow behaviour through smooth and stepped spillways using large-scale physical model. Tese de Doutorado, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

- Marques, T. (2008). Estudo de um betão compactado por cilindros. Tese de Mestrado, FCT Universidade Nova de Lisboa.
- Matos, J. (1999). Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Matos, J. e Meireles, I. (2014). Hydraulics of stepped weirs and dam spillways: engineering challenges, labyrinths of research. In Chanson, H. and Toombes, L., *Hydraulic structures and society - Engineering challenges and extremes*, Proceedings of 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Brisbane, Australia, 1-30.
- Matos, J. e Quintela, A. (1997). Escoamento em quedas sucessivas em descarregadores em degraus. Dissipação de energia. Simpósio sobre Aproveitamentos Eléctricos, APRH, Lisboa, Junho.
- Meireles, I. (2004). Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores de cheias em degraus. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Meireles, I. (2011). Hidráulica dos descarregadores em degraus: estudo experimental-numérico-teórico. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Meireles, I., Bombardelli, F., e Matos, J. (2010). Experimental and numerical investigation of the non-aerated skimming flow over stepped spillways over embankment dams. 1st European IAHR Congress, Edimburgo, Escócia.
- Meireles, I., Bombardelli, F., e Matos, J. (2014). Air entrainment onset in skimming flows on steep stepped spillways: an analysis. *Journal of Hydraulic Research*, 52(3):375–385.
- Meireles, I. e Matos, J. (2009). Skimming flow in the non aerated region of stepped spillways over embankment dams. *Journal of hydraulic engineering*, 135(10):685–689.
- Nieckele, A. O. (2015a). Equações de conservação. Textos de apoio às aulas da UC de Mecânica de Fluidos II, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, http://mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/Fentran_ENG1011/4-Fenomenos_de_Transporte-FormulacaoIntegral.pdf.
- Nieckele, A. O. (2015b). Equações médias de Reynolds. Textos de apoio às aulas da UC de Mecânica de Fluidos II, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, http://mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/Turbulencia_Mec2355/5-Turbulencia%E2%80%93Eq_Medias.pdf.
- Nieckele, A. O. (2015c). Modelos de turbulência. Textos de apoio às aulas da UC de Mecânica de Fluidos II, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, http://mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/Turbulencia_Mec2355/10-Turbulencia%E2%80%93Modelos_de_Turbulencia.pdf.
- Ohtsu, I. e Yasuda, Y. (1997). Characteristics of flow conditions on stepped channels. Proc. 27th IAHR Congress, Theme D, pp. 583-588, San Francisco, EUA.

- Pinheiro, A. e Fael, C. (2000). Nappe Flow in Stepped Channels-Ocurrence and Energy Dissipation. Proc. *International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, ETH Zurich, Minor, H. E., and Hager, W. H. Balkema, pp. 119-126.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge University Press, UK.
- Prandtl, L. (1925). Uber die ausgebildete turbulenz. *ZAMM*, 5:136–139.
- Prandtl, L. (1945). Uber ein neues formelsystem fur die ausgebildete turbulenz. *Nacr. Akad. Wiss. Gottingen, Math-Phys*, pages 6–19.
- Qian, Z., Hu, X., Huai, W., e Amador, A. (2009). Numerical simulation and analysis of water flow over stepped spillways. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52(7):1958–1965.
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4):587–591.
- Savage, B. M. e Johnson, M. C. (2001). Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(8):640–649.
- Schmitt, F. G. (2007). About boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity. *Comptes Rendus Mecanique*, 335(9-10):617–627. <http://users.ugent.be/~mvbelleg/literatuur%20SCHX%20-%20Stijn%20Daelman/ORCNext/Supercritical/Literature%20Study/Literature/Thermodynamic%20information%20-%20ORC/Boussinesq's%20turbulent%20viscosity%20hypothesis.pdf>.
- Silva, C. (2010a). Aula 3: Energia cinética e energia cinética resolvida. Textos de apoio às aulas da UC de Turbulência do Programa Doutoral em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico.
- Silva, C. (2010b). Aula 5: Teoria clássica da turbulência. Textos de apoio às aulas da UC de Turbulência do Programa Doutoral em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico.
- Silva, C. (2010c). Introdução às características de escoamentos turbulentos. Texto de apoio às aulas da UC de Mecânica de Fluidos II, Instituto Superior Técnico.
- Sousa, V. (2012). Introdução à dinâmica de fluidos computacional. Instituto Superior Técnico.
- Tabbara, M., Chatila, J., e Awwad, R. (2005). Computational simulation of flow over stepped spillway. *Computers and Structures*, 83:2215–2224.
- Tennekes, H., Lumley, J., Rocha, A., e Silva, C. B. (2010). *Turbulência em fluidos*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- USACE (2000). *Roller-Compacted Concrete*. US Army Corps of Engineers.
- Valero, D. e Bung, D. (2015). Hybrid investigation of air transport processes in moderately sloped stepped spillway flows. E-proceedings of the 36th IARRH World Congress, 28 Junho-3 Julho, Holanda.

Vanneste, D. (2012). *Experimental and numerical study of wave-induced porous flow in rubble-mound breakwaters*, chapter 5. Ghent University.

Versteeg, H. K. e Malalasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics*. Longman Scientific Technical.

Wilcox, D. C. (1993). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, Inc.

Yakhot, V., Orszag, S., S. Thangam, T. G., e Speziale, C. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A*, 4(7):1510–1520.

Anexo A

Regime permanente

As Figs. A.1 a A.4 apresentam a evolução, ao longo do tempo, de algumas quantidades que indicam se as simulações atingiram, ou não, o regime permanente. As Figs. referem-se a uma simulação para $Q=42$ l/s e malha 3 que atingiu o regime permanente aos 67 segundos.

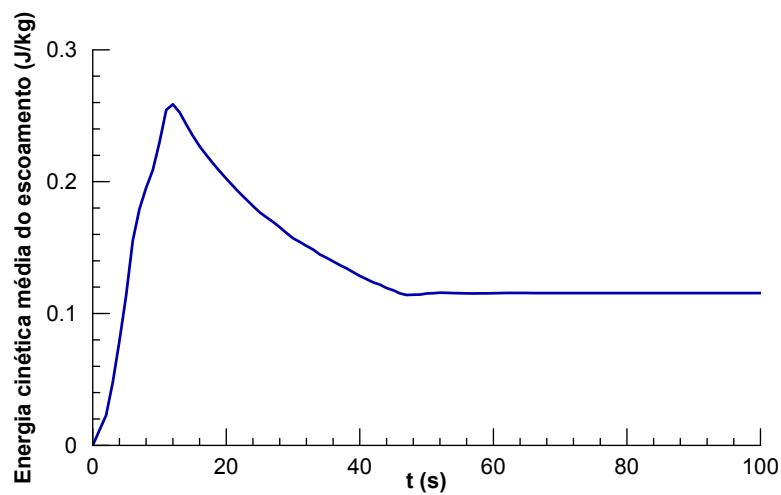


Figura A.1: Energia cinética média do escoamento (J/kg).

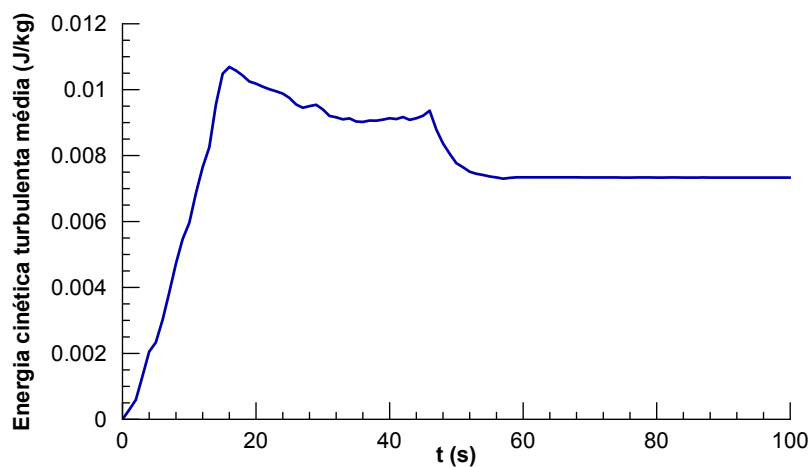


Figura A.2: Energia cinética turbulenta média (J/kg).

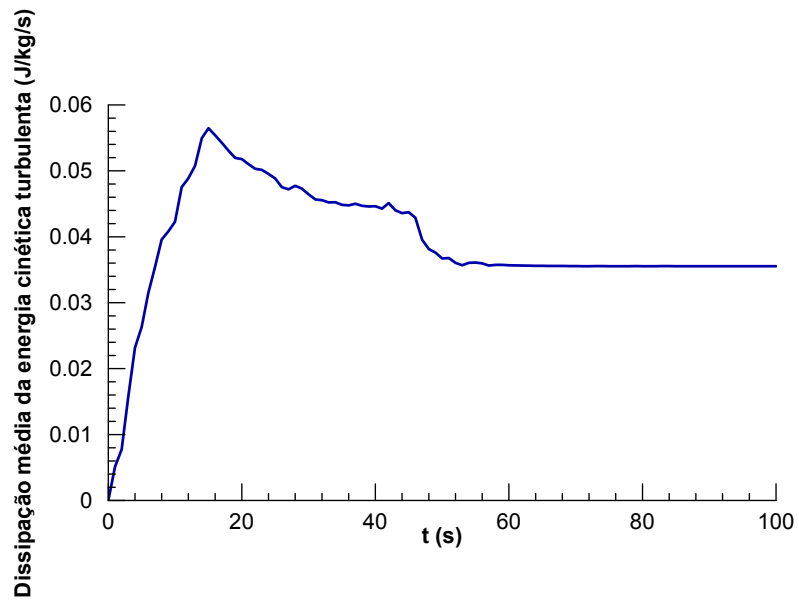


Figura A.3: Dissipação média da energia cinética turbulenta (J/kg/s).

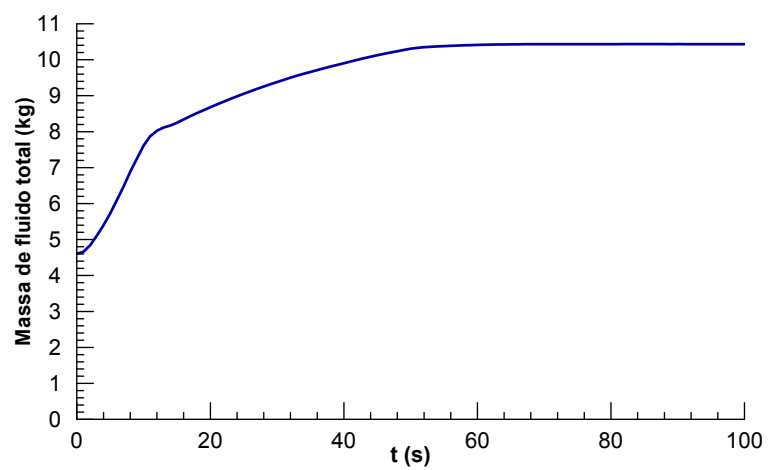


Figura A.4: Massa de fluido total (kg).

Anexo B

Comentário sobre a entrada de ar

Nas simulações que têm em conta os valores dos coeficientes de entrada de ar e de tensão superficial apresentados por omissão no FLOW-3D[®], não se observa entrada de ar no escoamento ao longo de todo o descarregador, apesar de ter sido observada entrada de ar nos ensaios experimentais. Das simulações de Meireles (2011) referentes a um descarregador em degraus com declive acentuado, observa-se que embora a localização da secção de afloramento da camada limite seja bem simulada pelo FLOW-3D[®] (Meireles et al., 2014), o transporte do ar no seio do escoamento não ocorre convenientemente, pelo que as concentrações de ar junto ao fundo são menores do que as observadas experimentalmente (Bombardelli, 2012). Em Burnham (2011b), é referido que uma das fragilidades do FLOW-3D[®] é a modelação da camada limite, devido às simplificações feitas quando se utiliza uma malha ortogonal. Esta simplificação não é problemática em problemas de grande escala, como rios e um grande número de descarregadores de cheias de barragens, pois nestas situações a hipótese da camada limite turbulenta completamente desenvolvida continua a ser válida. No presente estudo, a pequena dimensão do descarregador pode influenciar negativamente o cálculo numérico do desenvolvimento da camada limite e, conseqüentemente, afetar os resultados da entrada do ar. Neste sentido, seria desejável efetuar análises de sensibilidade à influência dos valores considerados para estes parâmetros na entrada de ar no seio do escoamento.

Dado o limitado espaço temporal deste trabalho, é feita a análise apenas ao coeficiente de tensão superficial para uma única situação de caudal ($Q=35$ l/s e malha 4). Uma vez que o anulamento do termo σ/L_T favorece o aumento das energias desestabilizadoras em relação às estabilizadoras e, conseqüentemente, a entrada de ar no seio do escoamento, é feita comparação entre a simulação que considera o valor do coeficiente de tensão superficial igual a 0.073 N/m e a simulação em que a tensão superficial da água é considerada nula. Pretende-se, assim, verificar se as simulações numéricas sem tensão superficial conseguem reproduzir a entrada de ar no sistema, sem deixar de simular corretamente a zona não arejada.

Verificou-se que na soleira descarregadora e na região não arejada do escoamento deslizante sobre turbilhões, as duas simulações apresentam idênticas alturas e velocidades do escoamento (Figs. B.1, B.2 e B.3). Apenas a partir da vertical 7, região em que se verifica entrada de ar na simulação considerando tensão superficial nula, há um empolamento da veia líquida de uma simulação em relação à outra, e uma ligeira diferença nos perfis de velocidade das verticais 8 e 9 (na ordem dos 4%). A Fig.

B.4, retirada do FLOW-3D[®], comprova que na simulação que considera tensão superficial igual a 0.073 N/m, não se verifica entrada de ar no canal descarregador, ao contrário do que acontece na simulação com tensão superficial nula.

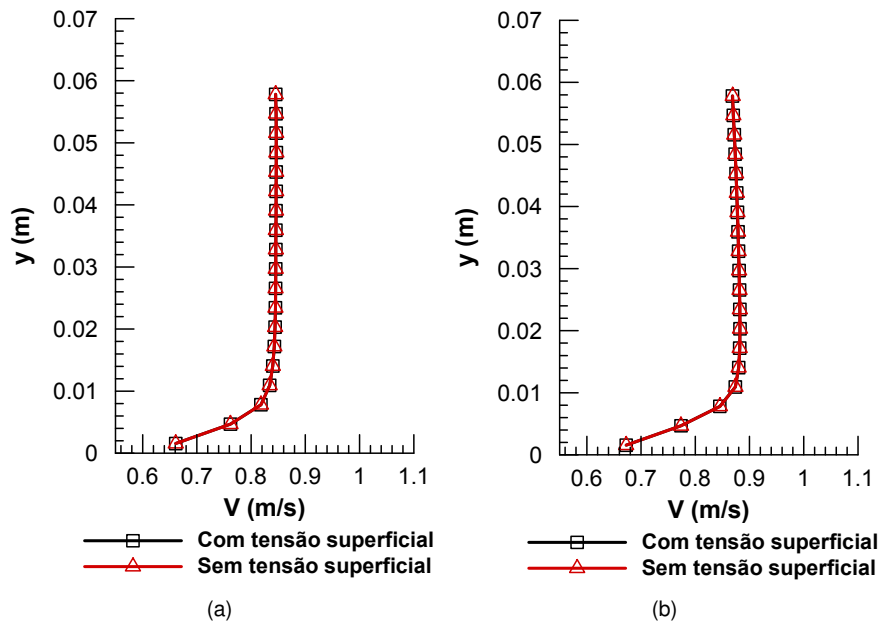


Figura B.1: Comparação de perfis de velocidade na soleira descarregadora em simulações com e sem tensão superficial: (a) secção 2; (b) secção 3 (Q=35 l/s e malha 4).

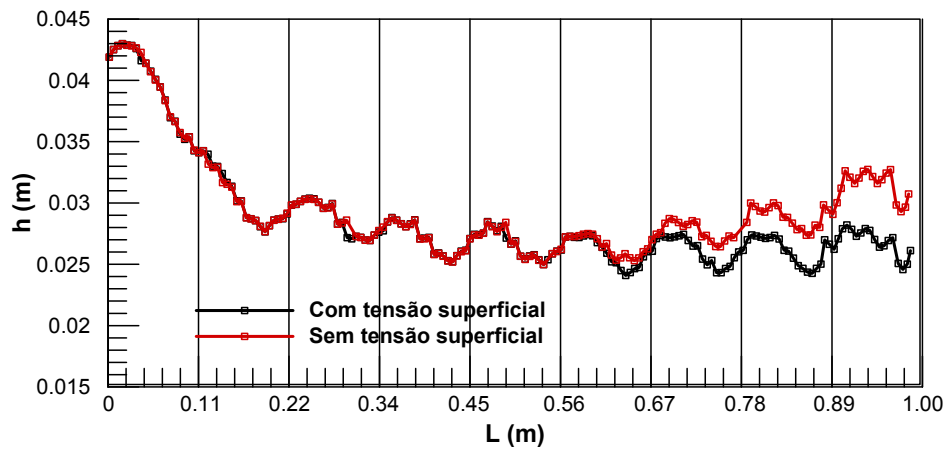


Figura B.2: Comparação das alturas do escoamento no canal descarregador em degraus em simulações com e sem tensão superficial (Q=35 l/s e malha 4).

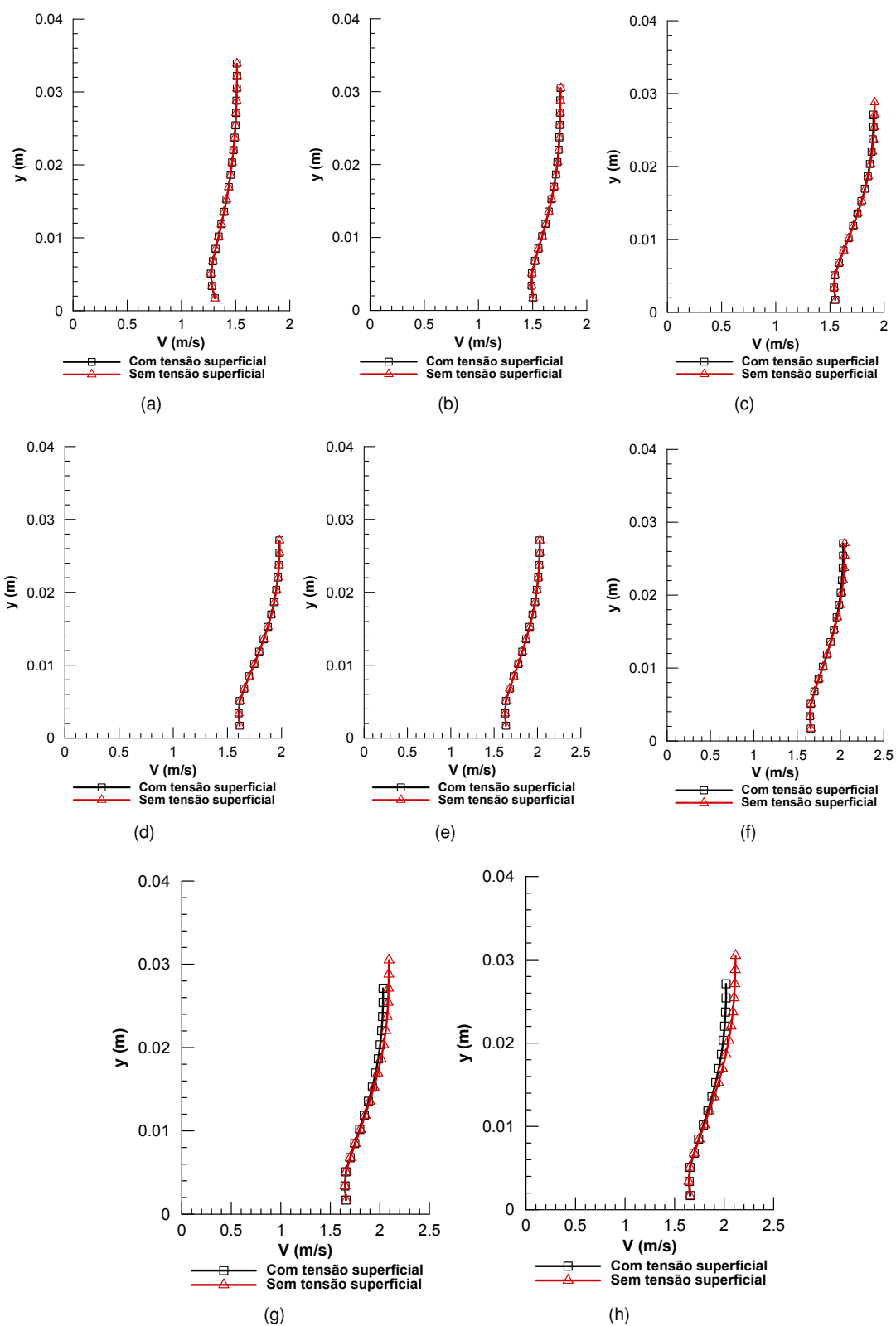
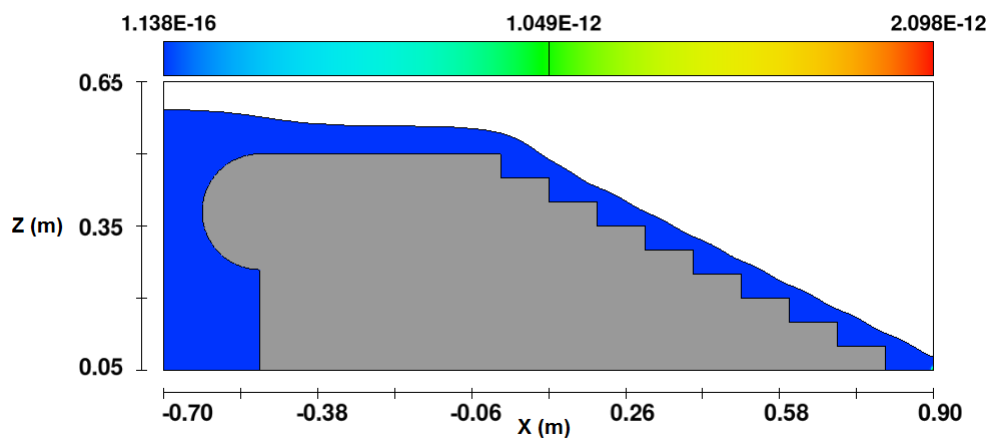
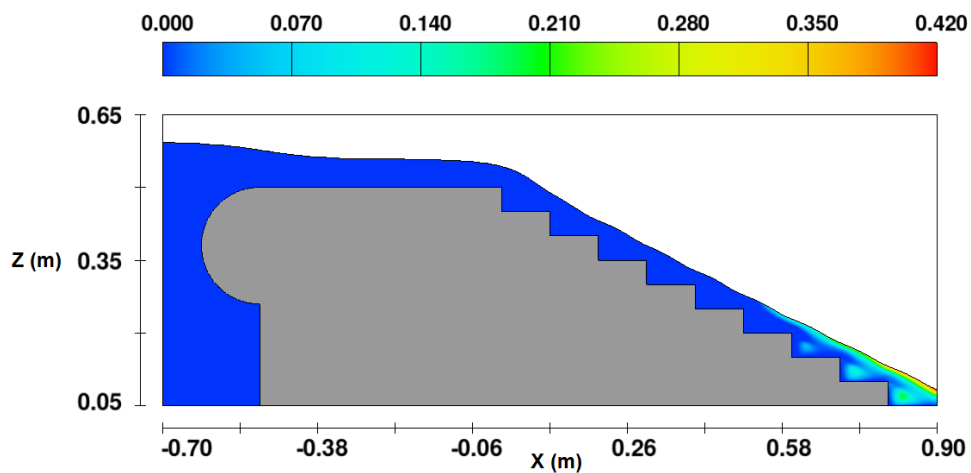


Figura B.3: Comparação dos perfis de velocidade do escoamento no canal descarregador em degraus em simulações com e sem tensão superficial: (a) vertical 2; (b) vertical 3; (c) vertical 4; (d) vertical 5; (e) vertical 6; (f) vertical 7; (g) vertical 8; (h) vertical 9 ($Q=35$ l/s e malha 4).



(a)



(b)

Figura B.4: Campo de concentração de ar: (a) com tensão superficial ; (b) sem tensão superficial ($Q=35$ l/s e malha 4).

Anexo C

Observação visual da entrada de ar no canal descarregador

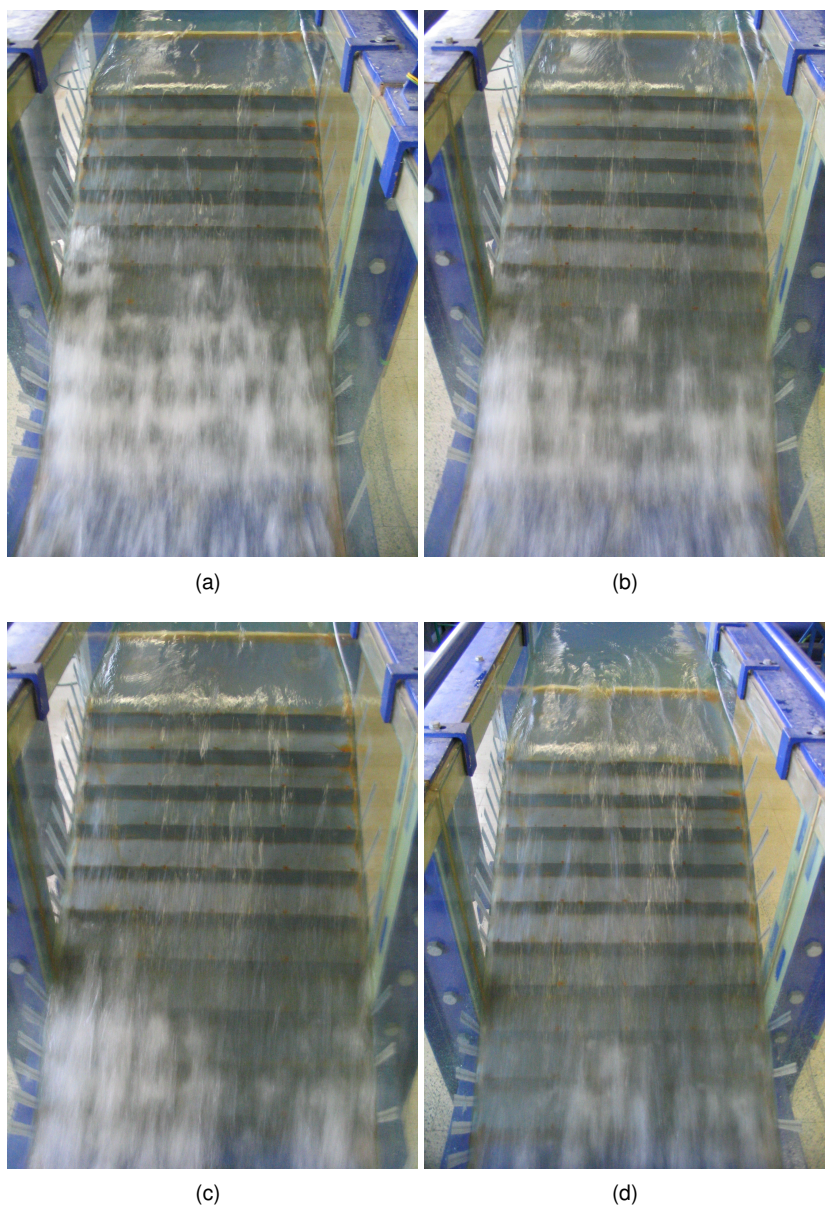


Figura C.1: Observação visual da entrada de ar no canal descarregador em degraus: (a) $Q=35$ l/s; (b) $Q=42$ l/s; (c) $Q=49$ l/s; (d) $Q=56$ l/s (Fot.: André e Ramos, 2003).

Anexo D

Distância adimensional à parede (y^+)

D.1 Valores de y^+ para 42 l/s

Tabela D.1: Valores de y^+ na soleira para 42 l/s e malha 4.

x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+
-4.98E-01	6.58E+01	-3.73E-01	6.83E+01	-2.48E-01	7.13E+01	-1.23E-01	7.37E+01
-4.95E-01	6.50E+01	-3.70E-01	6.84E+01	-2.45E-01	7.13E+01	-1.20E-01	7.39E+01
-4.92E-01	6.44E+01	-3.67E-01	6.86E+01	-2.42E-01	7.13E+01	-1.17E-01	7.41E+01
-4.89E-01	6.39E+01	-3.64E-01	6.88E+01	-2.39E-01	7.13E+01	-1.14E-01	7.43E+01
-4.86E-01	6.36E+01	-3.61E-01	6.89E+01	-2.36E-01	7.13E+01	-1.11E-01	7.46E+01
-4.83E-01	6.34E+01	-3.58E-01	6.91E+01	-2.33E-01	7.13E+01	-1.08E-01	7.48E+01
-4.80E-01	6.32E+01	-3.55E-01	6.92E+01	-2.30E-01	7.14E+01	-1.05E-01	7.51E+01
-4.77E-01	6.31E+01	-3.52E-01	6.94E+01	-2.27E-01	7.14E+01	-1.02E-01	7.54E+01
-4.73E-01	6.30E+01	-3.48E-01	6.95E+01	-2.23E-01	7.14E+01	-9.84E-02	7.57E+01
-4.70E-01	6.30E+01	-3.45E-01	6.96E+01	-2.20E-01	7.14E+01	-9.53E-02	7.60E+01
-4.67E-01	6.30E+01	-3.42E-01	6.97E+01	-2.17E-01	7.14E+01	-9.22E-02	7.63E+01
-4.64E-01	6.30E+01	-3.39E-01	6.98E+01	-2.14E-01	7.14E+01	-8.91E-02	7.67E+01
-4.61E-01	6.31E+01	-3.36E-01	7.00E+01	-2.11E-01	7.14E+01	-8.59E-02	7.71E+01
-4.58E-01	6.32E+01	-3.33E-01	7.01E+01	-2.08E-01	7.15E+01	-8.28E-02	7.75E+01
-4.55E-01	6.33E+01	-3.30E-01	7.02E+01	-2.05E-01	7.15E+01	-7.97E-02	7.79E+01
-4.52E-01	6.34E+01	-3.27E-01	7.02E+01	-2.02E-01	7.15E+01	-7.66E-02	7.84E+01
-4.48E-01	6.36E+01	-3.23E-01	7.03E+01	-1.98E-01	7.15E+01	-7.34E-02	7.89E+01
-4.45E-01	6.37E+01	-3.20E-01	7.04E+01	-1.95E-01	7.16E+01	-7.03E-02	7.94E+01
-4.42E-01	6.39E+01	-3.17E-01	7.05E+01	-1.92E-01	7.16E+01	-6.72E-02	7.99E+01
-4.39E-01	6.41E+01	-3.14E-01	7.06E+01	-1.89E-01	7.16E+01	-6.41E-02	8.05E+01
-4.36E-01	6.43E+01	-3.11E-01	7.06E+01	-1.86E-01	7.17E+01	-6.09E-02	8.12E+01
-4.33E-01	6.44E+01	-3.08E-01	7.07E+01	-1.83E-01	7.17E+01	-5.78E-02	8.19E+01
-4.30E-01	6.46E+01	-3.05E-01	7.08E+01	-1.80E-01	7.18E+01	-5.47E-02	8.26E+01
-4.27E-01	6.49E+01	-3.02E-01	7.08E+01	-1.77E-01	7.18E+01	-5.16E-02	8.34E+01
-4.23E-01	6.51E+01	-2.98E-01	7.09E+01	-1.73E-01	7.19E+01	-4.84E-02	8.42E+01
-4.20E-01	6.53E+01	-2.95E-01	7.09E+01	-1.70E-01	7.19E+01	-4.53E-02	8.51E+01
-4.17E-01	6.55E+01	-2.92E-01	7.10E+01	-1.67E-01	7.20E+01	-4.22E-02	8.61E+01
-4.14E-01	6.57E+01	-2.89E-01	7.10E+01	-1.64E-01	7.21E+01	-3.91E-02	8.72E+01
-4.11E-01	6.59E+01	-2.86E-01	7.10E+01	-1.61E-01	7.22E+01	-3.59E-02	8.84E+01
-4.08E-01	6.61E+01	-2.83E-01	7.11E+01	-1.58E-01	7.22E+01	-3.28E-02	8.96E+01
-4.05E-01	6.63E+01	-2.80E-01	7.11E+01	-1.55E-01	7.23E+01	-2.97E-02	9.10E+01
-4.02E-01	6.65E+01	-2.77E-01	7.11E+01	-1.52E-01	7.24E+01	-2.66E-02	9.26E+01
-3.98E-01	6.67E+01	-2.73E-01	7.11E+01	-1.48E-01	7.25E+01	-2.34E-02	9.43E+01
-3.95E-01	6.70E+01	-2.70E-01	7.12E+01	-1.45E-01	7.26E+01	-2.03E-02	9.62E+01
-3.92E-01	6.72E+01	-2.67E-01	7.12E+01	-1.42E-01	7.28E+01	-1.72E-02	9.84E+01
-3.89E-01	6.74E+01	-2.64E-01	7.12E+01	-1.39E-01	7.29E+01	-1.41E-02	1.01E+02
-3.86E-01	6.75E+01	-2.61E-01	7.12E+01	-1.36E-01	7.30E+01	-1.09E-02	1.04E+02
-3.83E-01	6.77E+01	-2.58E-01	7.12E+01	-1.33E-01	7.32E+01	-7.81E-03	1.08E+02
-3.80E-01	6.79E+01	-2.55E-01	7.13E+01	-1.30E-01	7.33E+01	-4.69E-03	1.12E+02
-3.77E-01	6.81E+01	-2.52E-01	7.13E+01	-1.27E-01	7.35E+01	-1.56E-03	1.19E+02

Tabela D.2: Valores de y^+ na bacia de dissipação para 42 l/s e malha 4.

x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+
9.03E-01	6.32E+01	1.32E+00	2.11E+02	1.74E+00	1.25E+02	2.16E+00	7.14E+01	2.58E+00	6.53E+01
9.09E-01	1.07E+02	1.33E+00	2.09E+02	1.75E+00	1.24E+02	2.17E+00	7.10E+01	2.58E+00	6.54E+01
9.16E-01	1.40E+02	1.33E+00	2.08E+02	1.75E+00	1.22E+02	2.17E+00	7.07E+01	2.59E+00	6.55E+01
9.22E-01	1.57E+02	1.34E+00	2.07E+02	1.76E+00	1.21E+02	2.18E+00	7.03E+01	2.60E+00	6.57E+01
9.28E-01	1.61E+02	1.35E+00	2.06E+02	1.77E+00	1.20E+02	2.18E+00	7.00E+01	2.60E+00	6.58E+01
9.34E-01	1.54E+02	1.35E+00	2.05E+02	1.77E+00	1.19E+02	2.19E+00	6.96E+01	2.61E+00	6.59E+01
9.41E-01	1.37E+02	1.36E+00	2.04E+02	1.78E+00	1.18E+02	2.20E+00	6.93E+01	2.62E+00	6.61E+01
9.47E-01	1.12E+02	1.37E+00	2.03E+02	1.78E+00	1.17E+02	2.20E+00	6.90E+01	2.62E+00	6.62E+01
9.53E-01	8.11E+01	1.37E+00	2.02E+02	1.79E+00	1.16E+02	2.21E+00	6.87E+01	2.63E+00	6.63E+01
9.59E-01	4.55E+01	1.38E+00	2.00E+02	1.80E+00	1.15E+02	2.22E+00	6.84E+01	2.63E+00	6.65E+01
9.66E-01	2.34E+00	1.38E+00	1.99E+02	1.80E+00	1.13E+02	2.22E+00	6.81E+01	2.64E+00	6.66E+01
9.72E-01	4.60E+01	1.39E+00	1.98E+02	1.81E+00	1.12E+02	2.23E+00	6.79E+01	2.65E+00	6.68E+01
9.78E-01	7.86E+01	1.40E+00	1.97E+02	1.82E+00	1.11E+02	2.23E+00	6.76E+01	2.65E+00	6.69E+01
9.84E-01	1.06E+02	1.40E+00	1.96E+02	1.82E+00	1.10E+02	2.24E+00	6.73E+01	2.66E+00	6.71E+01
9.91E-01	1.30E+02	1.41E+00	1.94E+02	1.83E+00	1.09E+02	2.25E+00	6.71E+01	2.67E+00	6.72E+01
9.97E-01	1.51E+02	1.42E+00	1.93E+02	1.83E+00	1.08E+02	2.25E+00	6.69E+01	2.67E+00	6.74E+01
1.00E+00	1.69E+02	1.42E+00	1.92E+02	1.84E+00	1.07E+02	2.26E+00	6.66E+01	2.68E+00	6.75E+01
1.01E+00	1.84E+02	1.43E+00	1.91E+02	1.85E+00	1.06E+02	2.27E+00	6.64E+01	2.68E+00	6.76E+01
1.02E+00	1.96E+02	1.43E+00	1.89E+02	1.85E+00	1.05E+02	2.27E+00	6.62E+01	2.69E+00	6.78E+01
1.02E+00	2.07E+02	1.44E+00	1.88E+02	1.86E+00	1.04E+02	2.28E+00	6.60E+01	2.70E+00	6.79E+01
1.03E+00	2.15E+02	1.45E+00	1.87E+02	1.87E+00	1.03E+02	2.28E+00	6.58E+01	2.70E+00	6.81E+01
1.03E+00	2.22E+02	1.45E+00	1.85E+02	1.87E+00	1.02E+02	2.29E+00	6.56E+01	2.71E+00	6.82E+01
1.04E+00	2.27E+02	1.46E+00	1.84E+02	1.88E+00	1.01E+02	2.30E+00	6.55E+01	2.72E+00	6.84E+01
1.05E+00	2.32E+02	1.47E+00	1.83E+02	1.88E+00	1.00E+02	2.30E+00	6.53E+01	2.72E+00	6.85E+01
1.05E+00	2.35E+02	1.47E+00	1.81E+02	1.89E+00	9.94E+01	2.31E+00	6.51E+01	2.73E+00	6.87E+01
1.06E+00	2.37E+02	1.48E+00	1.80E+02	1.90E+00	9.85E+01	2.32E+00	6.50E+01	2.73E+00	6.88E+01
1.07E+00	2.39E+02	1.48E+00	1.79E+02	1.90E+00	9.76E+01	2.32E+00	6.48E+01	2.74E+00	6.90E+01
1.07E+00	2.40E+02	1.49E+00	1.77E+02	1.91E+00	9.67E+01	2.33E+00	6.47E+01	2.75E+00	6.91E+01
1.08E+00	2.41E+02	1.50E+00	1.76E+02	1.92E+00	9.58E+01	2.33E+00	6.45E+01	2.75E+00	6.93E+01
1.08E+00	2.41E+02	1.50E+00	1.74E+02	1.92E+00	9.49E+01	2.34E+00	6.44E+01	2.76E+00	6.94E+01
1.09E+00	2.41E+02	1.51E+00	1.73E+02	1.93E+00	9.41E+01	2.35E+00	6.43E+01	2.77E+00	6.95E+01
1.10E+00	2.41E+02	1.52E+00	1.72E+02	1.93E+00	9.32E+01	2.35E+00	6.42E+01	2.77E+00	6.97E+01
1.10E+00	2.41E+02	1.52E+00	1.70E+02	1.94E+00	9.24E+01	2.36E+00	6.41E+01	2.78E+00	6.98E+01
1.11E+00	2.40E+02	1.53E+00	1.69E+02	1.95E+00	9.16E+01	2.37E+00	6.40E+01	2.78E+00	7.00E+01
1.12E+00	2.40E+02	1.53E+00	1.68E+02	1.95E+00	9.08E+01	2.37E+00	6.39E+01	2.79E+00	7.01E+01
1.12E+00	2.39E+02	1.54E+00	1.66E+02	1.96E+00	9.00E+01	2.38E+00	6.38E+01	2.80E+00	7.02E+01
1.13E+00	2.39E+02	1.55E+00	1.65E+02	1.97E+00	8.92E+01	2.38E+00	6.37E+01	2.80E+00	7.04E+01
1.13E+00	2.38E+02	1.55E+00	1.63E+02	1.97E+00	8.85E+01	2.39E+00	6.37E+01	2.81E+00	7.05E+01
1.14E+00	2.37E+02	1.56E+00	1.62E+02	1.98E+00	8.77E+01	2.40E+00	6.36E+01	2.82E+00	7.06E+01
1.15E+00	2.37E+02	1.57E+00	1.61E+02	1.98E+00	8.70E+01	2.40E+00	6.36E+01	2.82E+00	7.08E+01
1.15E+00	2.36E+02	1.57E+00	1.59E+02	1.99E+00	8.63E+01	2.41E+00	6.35E+01	2.83E+00	7.09E+01
1.16E+00	2.35E+02	1.58E+00	1.58E+02	2.00E+00	8.55E+01	2.42E+00	6.35E+01	2.83E+00	7.10E+01
1.17E+00	2.34E+02	1.58E+00	1.57E+02	2.00E+00	8.48E+01	2.42E+00	6.35E+01	2.84E+00	7.11E+01
1.17E+00	2.33E+02	1.59E+00	1.55E+02	2.01E+00	8.42E+01	2.43E+00	6.35E+01	2.85E+00	7.13E+01
1.18E+00	2.32E+02	1.60E+00	1.54E+02	2.02E+00	8.35E+01	2.43E+00	6.35E+01	2.85E+00	7.14E+01
1.18E+00	2.31E+02	1.60E+00	1.53E+02	2.02E+00	8.28E+01	2.44E+00	6.35E+01	2.86E+00	7.15E+01
1.19E+00	2.31E+02	1.61E+00	1.51E+02	2.03E+00	8.22E+01	2.45E+00	6.35E+01	2.87E+00	7.16E+01
1.20E+00	2.30E+02	1.62E+00	1.50E+02	2.03E+00	8.16E+01	2.45E+00	6.35E+01	2.87E+00	7.17E+01
1.20E+00	2.29E+02	1.62E+00	1.49E+02	2.04E+00	8.09E+01	2.46E+00	6.35E+01	2.88E+00	7.18E+01
1.21E+00	2.28E+02	1.63E+00	1.47E+02	2.05E+00	8.03E+01	2.47E+00	6.36E+01	2.88E+00	7.19E+01
1.22E+00	2.27E+02	1.63E+00	1.46E+02	2.05E+00	7.97E+01	2.47E+00	6.36E+01	2.89E+00	7.21E+01
1.22E+00	2.26E+02	1.64E+00	1.45E+02	2.06E+00	7.91E+01	2.48E+00	6.37E+01	2.90E+00	7.22E+01
1.23E+00	2.25E+02	1.65E+00	1.43E+02	2.07E+00	7.86E+01	2.48E+00	6.37E+01	2.90E+00	7.23E+01
1.23E+00	2.24E+02	1.65E+00	1.42E+02	2.07E+00	7.80E+01	2.49E+00	6.38E+01	2.91E+00	7.24E+01
1.24E+00	2.23E+02	1.66E+00	1.41E+02	2.08E+00	7.75E+01	2.50E+00	6.39E+01	2.92E+00	7.25E+01
1.25E+00	2.22E+02	1.67E+00	1.39E+02	2.08E+00	7.69E+01	2.50E+00	6.40E+01	2.92E+00	7.26E+01
1.25E+00	2.21E+02	1.67E+00	1.38E+02	2.09E+00	7.64E+01	2.51E+00	6.41E+01	2.93E+00	7.27E+01
1.26E+00	2.20E+02	1.68E+00	1.37E+02	2.10E+00	7.59E+01	2.52E+00	6.41E+01	2.93E+00	7.28E+01
1.27E+00	2.20E+02	1.68E+00	1.36E+02	2.10E+00	7.54E+01	2.52E+00	6.42E+01	2.94E+00	7.28E+01
1.27E+00	2.19E+02	1.69E+00	1.34E+02	2.11E+00	7.49E+01	2.53E+00	6.43E+01	2.95E+00	7.29E+01
1.28E+00	2.18E+02	1.70E+00	1.33E+02	2.12E+00	7.44E+01	2.53E+00	6.44E+01	2.95E+00	7.30E+01
1.28E+00	2.17E+02	1.70E+00	1.32E+02	2.12E+00	7.39E+01	2.54E+00	6.46E+01	2.96E+00	7.31E+01
1.29E+00	2.16E+02	1.71E+00	1.31E+02	2.13E+00	7.35E+01	2.55E+00	6.47E+01	2.97E+00	7.32E+01
1.30E+00	2.15E+02	1.72E+00	1.30E+02	2.13E+00	7.30E+01	2.55E+00	6.48E+01	2.97E+00	7.33E+01
1.30E+00	2.14E+02	1.72E+00	1.28E+02	2.14E+00	7.26E+01	2.56E+00	6.49E+01	2.98E+00	7.34E+01
1.31E+00	2.13E+02	1.73E+00	1.27E+02	2.15E+00	7.22E+01	2.57E+00	6.50E+01	2.98E+00	7.35E+01
1.32E+00	2.12E+02	1.73E+00	1.26E+02	2.15E+00	7.18E+01	2.57E+00	6.51E+01

Tabela D.3: Valores de y^+ na soleira para 42 l/s e malha 5.

x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+
-4.99E-01	5.36E+01	-3.99E-01	5.35E+01	-2.99E-01	5.67E+01	-1.99E-01	5.71E+01	-9.87E-02	6.04E+01
-4.96E-01	5.30E+01	-3.96E-01	5.36E+01	-2.96E-01	5.67E+01	-1.96E-01	5.71E+01	-9.62E-02	6.06E+01
-4.94E-01	5.25E+01	-3.94E-01	5.38E+01	-2.94E-01	5.68E+01	-1.94E-01	5.71E+01	-9.38E-02	6.08E+01
-4.91E-01	5.21E+01	-3.91E-01	5.39E+01	-2.91E-01	5.68E+01	-1.91E-01	5.71E+01	-9.13E-02	6.10E+01
-4.89E-01	5.17E+01	-3.89E-01	5.40E+01	-2.89E-01	5.68E+01	-1.89E-01	5.71E+01	-8.88E-02	6.13E+01
-4.86E-01	5.15E+01	-3.86E-01	5.41E+01	-2.86E-01	5.68E+01	-1.86E-01	5.72E+01	-8.63E-02	6.15E+01
-4.84E-01	5.13E+01	-3.84E-01	5.43E+01	-2.84E-01	5.68E+01	-1.84E-01	5.72E+01	-8.38E-02	6.18E+01
-4.81E-01	5.11E+01	-3.81E-01	5.44E+01	-2.81E-01	5.69E+01	-1.81E-01	5.72E+01	-8.12E-02	6.21E+01
-4.79E-01	5.10E+01	-3.79E-01	5.45E+01	-2.79E-01	5.69E+01	-1.79E-01	5.72E+01	-7.87E-02	6.24E+01
-4.76E-01	5.09E+01	-3.76E-01	5.46E+01	-2.76E-01	5.69E+01	-1.76E-01	5.73E+01	-7.63E-02	6.27E+01
-4.74E-01	5.08E+01	-3.74E-01	5.47E+01	-2.74E-01	5.69E+01	-1.74E-01	5.73E+01	-7.38E-02	6.30E+01
-4.71E-01	5.08E+01	-3.71E-01	5.48E+01	-2.71E-01	5.69E+01	-1.71E-01	5.73E+01	-7.12E-02	6.34E+01
-4.69E-01	5.08E+01	-3.69E-01	5.49E+01	-2.69E-01	5.69E+01	-1.69E-01	5.74E+01	-6.88E-02	6.37E+01
-4.66E-01	5.08E+01	-3.66E-01	5.50E+01	-2.66E-01	5.69E+01	-1.66E-01	5.74E+01	-6.62E-02	6.41E+01
-4.64E-01	5.08E+01	-3.64E-01	5.51E+01	-2.64E-01	5.69E+01	-1.64E-01	5.75E+01	-6.37E-02	6.45E+01
-4.61E-01	5.08E+01	-3.61E-01	5.52E+01	-2.61E-01	5.69E+01	-1.61E-01	5.75E+01	-6.13E-02	6.49E+01
-4.59E-01	5.08E+01	-3.59E-01	5.53E+01	-2.59E-01	5.69E+01	-1.59E-01	5.76E+01	-5.88E-02	6.54E+01
-4.56E-01	5.09E+01	-3.56E-01	5.54E+01	-2.56E-01	5.69E+01	-1.56E-01	5.76E+01	-5.62E-02	6.59E+01
-4.54E-01	5.09E+01	-3.54E-01	5.55E+01	-2.54E-01	5.69E+01	-1.54E-01	5.77E+01	-5.38E-02	6.64E+01
-4.51E-01	5.10E+01	-3.51E-01	5.56E+01	-2.51E-01	5.70E+01	-1.51E-01	5.78E+01	-5.13E-02	6.69E+01
-4.49E-01	5.11E+01	-3.49E-01	5.57E+01	-2.49E-01	5.70E+01	-1.49E-01	5.78E+01	-4.87E-02	6.74E+01
-4.46E-01	5.12E+01	-3.46E-01	5.57E+01	-2.46E-01	5.70E+01	-1.46E-01	5.79E+01	-4.63E-02	6.80E+01
-4.44E-01	5.13E+01	-3.44E-01	5.58E+01	-2.44E-01	5.70E+01	-1.44E-01	5.80E+01	-4.38E-02	6.87E+01
-4.41E-01	5.14E+01	-3.41E-01	5.59E+01	-2.41E-01	5.70E+01	-1.41E-01	5.81E+01	-4.12E-02	6.93E+01
-4.39E-01	5.15E+01	-3.39E-01	5.60E+01	-2.39E-01	5.70E+01	-1.39E-01	5.81E+01	-3.88E-02	7.01E+01
-4.36E-01	5.16E+01	-3.36E-01	5.60E+01	-2.36E-01	5.70E+01	-1.36E-01	5.82E+01	-3.63E-02	7.08E+01
-4.34E-01	5.17E+01	-3.34E-01	5.61E+01	-2.34E-01	5.70E+01	-1.34E-01	5.83E+01	-3.37E-02	7.17E+01
-4.31E-01	5.18E+01	-3.31E-01	5.62E+01	-2.31E-01	5.70E+01	-1.31E-01	5.84E+01	-3.13E-02	7.26E+01
-4.29E-01	5.19E+01	-3.29E-01	5.62E+01	-2.29E-01	5.70E+01	-1.29E-01	5.85E+01	-2.87E-02	7.35E+01
-4.26E-01	5.21E+01	-3.26E-01	5.63E+01	-2.26E-01	5.70E+01	-1.26E-01	5.87E+01	-2.63E-02	7.45E+01
-4.24E-01	5.22E+01	-3.24E-01	5.63E+01	-2.24E-01	5.70E+01	-1.24E-01	5.88E+01	-2.38E-02	7.57E+01
-4.21E-01	5.23E+01	-3.21E-01	5.64E+01	-2.21E-01	5.70E+01	-1.21E-01	5.89E+01	-2.13E-02	7.69E+01
-4.19E-01	5.25E+01	-3.19E-01	5.64E+01	-2.19E-01	5.70E+01	-1.19E-01	5.90E+01	-1.88E-02	7.83E+01
-4.16E-01	5.26E+01	-3.16E-01	5.65E+01	-2.16E-01	5.70E+01	-1.16E-01	5.92E+01	-1.62E-02	7.98E+01
-4.14E-01	5.27E+01	-3.14E-01	5.65E+01	-2.14E-01	5.70E+01	-1.14E-01	5.93E+01	-1.38E-02	8.15E+01
-4.11E-01	5.29E+01	-3.11E-01	5.65E+01	-2.11E-01	5.70E+01	-1.11E-01	5.95E+01	-1.13E-02	8.35E+01
-4.09E-01	5.30E+01	-3.09E-01	5.66E+01	-2.09E-01	5.70E+01	-1.09E-01	5.96E+01	-8.75E-03	8.58E+01
-4.06E-01	5.31E+01	-3.06E-01	5.66E+01	-2.06E-01	5.70E+01	-1.06E-01	5.98E+01	-6.25E-03	8.87E+01
-4.04E-01	5.33E+01	-3.04E-01	5.67E+01	-2.04E-01	5.70E+01	-1.04E-01	6.00E+01	-3.75E-03	9.24E+01
-4.01E-01	5.34E+01	-3.01E-01	5.67E+01	-2.01E-01	5.71E+01	-1.01E-01	6.02E+01	-1.25E-03	9.77E+01

Tabela D.4: Valores de y^+ no início da bacia de dissipação para 42 l/s e malha 5.

x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+	x (m)	y+
9.02E-01	4.70E+01	1.20E+00	1.92E+02	1.49E+00	1.53E+02	1.79E+00	1.06E+02	2.08E+00	7.47E+01
9.08E-01	8.08E+01	1.20E+00	1.91E+02	1.50E+00	1.52E+02	1.79E+00	1.05E+02	2.09E+00	7.43E+01
9.13E-01	1.08E+02	1.21E+00	1.91E+02	1.50E+00	1.51E+02	1.80E+00	1.04E+02	2.09E+00	7.38E+01
9.18E-01	1.24E+02	1.21E+00	1.90E+02	1.51E+00	1.50E+02	1.80E+00	1.04E+02	2.10E+00	7.34E+01
9.23E-01	1.32E+02	1.22E+00	1.90E+02	1.51E+00	1.49E+02	1.81E+00	1.03E+02	2.10E+00	7.30E+01
9.28E-01	1.35E+02	1.22E+00	1.89E+02	1.52E+00	1.48E+02	1.81E+00	1.02E+02	2.11E+00	7.26E+01
9.33E-01	1.33E+02	1.23E+00	1.89E+02	1.52E+00	1.48E+02	1.82E+00	1.02E+02	2.11E+00	7.22E+01
9.38E-01	1.26E+02	1.23E+00	1.88E+02	1.53E+00	1.47E+02	1.82E+00	1.01E+02	2.12E+00	7.18E+01
9.43E-01	1.15E+02	1.24E+00	1.88E+02	1.53E+00	1.46E+02	1.83E+00	1.00E+02	2.12E+00	7.15E+01
9.47E-01	1.00E+02	1.24E+00	1.87E+02	1.54E+00	1.45E+02	1.83E+00	9.97E+01	2.13E+00	7.11E+01
9.52E-01	8.31E+01	1.25E+00	1.87E+02	1.54E+00	1.44E+02	1.84E+00	9.91E+01	2.13E+00	7.07E+01
9.57E-01	6.31E+01	1.25E+00	1.86E+02	1.55E+00	1.43E+02	1.84E+00	9.85E+01	2.14E+00	7.03E+01
9.62E-01	4.05E+01	1.26E+00	1.86E+02	1.55E+00	1.42E+02	1.85E+00	9.79E+01	2.14E+00	6.99E+01
9.67E-01	1.39E+01	1.26E+00	1.85E+02	1.56E+00	1.41E+02	1.85E+00	9.73E+01	2.15E+00	6.95E+01
9.73E-01	2.04E+01	1.27E+00	1.85E+02	1.56E+00	1.41E+02	1.86E+00	9.67E+01	2.15E+00	6.91E+01
9.78E-01	4.45E+01	1.27E+00	1.84E+02	1.57E+00	1.40E+02	1.86E+00	9.61E+01	2.16E+00	6.87E+01
9.83E-01	6.50E+01	1.28E+00	1.84E+02	1.57E+00	1.39E+02	1.87E+00	9.56E+01	2.16E+00	6.84E+01
9.88E-01	8.29E+01	1.28E+00	1.83E+02	1.58E+00	1.38E+02	1.87E+00	9.50E+01	2.17E+00	6.80E+01
9.93E-01	9.89E+01	1.29E+00	1.83E+02	1.58E+00	1.37E+02	1.88E+00	9.44E+01	2.17E+00	6.76E+01
9.98E-01	1.13E+02	1.29E+00	1.82E+02	1.59E+00	1.36E+02	1.88E+00	9.39E+01	2.18E+00	6.73E+01
1.00E+00	1.26E+02	1.30E+00	1.82E+02	1.59E+00	1.35E+02	1.89E+00	9.33E+01	2.18E+00	6.69E+01
1.01E+00	1.37E+02	1.30E+00	1.81E+02	1.60E+00	1.35E+02	1.89E+00	9.27E+01	2.19E+00	6.66E+01
1.01E+00	1.47E+02	1.31E+00	1.80E+02	1.60E+00	1.34E+02	1.90E+00	9.22E+01	2.19E+00	6.62E+01
1.02E+00	1.55E+02	1.31E+00	1.80E+02	1.61E+00	1.33E+02	1.90E+00	9.16E+01	2.20E+00	6.58E+01
1.02E+00	1.63E+02	1.32E+00	1.79E+02	1.61E+00	1.32E+02	1.91E+00	9.11E+01	2.20E+00	6.55E+01
1.03E+00	1.69E+02	1.32E+00	1.79E+02	1.62E+00	1.31E+02	1.91E+00	9.06E+01	2.21E+00	6.51E+01
1.03E+00	1.74E+02	1.33E+00	1.78E+02	1.62E+00	1.30E+02	1.92E+00	9.00E+01	2.21E+00	6.48E+01
1.04E+00	1.79E+02	1.33E+00	1.77E+02	1.63E+00	1.30E+02	1.92E+00	8.95E+01	2.22E+00	6.44E+01
1.04E+00	1.83E+02	1.34E+00	1.77E+02	1.63E+00	1.29E+02	1.93E+00	8.90E+01	2.22E+00	6.41E+01
1.05E+00	1.86E+02	1.34E+00	1.76E+02	1.64E+00	1.28E+02	1.93E+00	8.85E+01	2.23E+00	6.38E+01
1.05E+00	1.89E+02	1.35E+00	1.75E+02	1.64E+00	1.27E+02	1.94E+00	8.80E+01	2.23E+00	6.34E+01
1.06E+00	1.91E+02	1.35E+00	1.75E+02	1.65E+00	1.26E+02	1.94E+00	8.75E+01	2.24E+00	6.31E+01
1.06E+00	1.92E+02	1.36E+00	1.74E+02	1.65E+00	1.25E+02	1.95E+00	8.69E+01	2.24E+00	6.28E+01
1.07E+00	1.94E+02	1.36E+00	1.73E+02	1.66E+00	1.25E+02	1.95E+00	8.64E+01	2.25E+00	6.24E+01
1.07E+00	1.95E+02	1.37E+00	1.73E+02	1.66E+00	1.24E+02	1.96E+00	8.59E+01	2.25E+00	6.21E+01
1.08E+00	1.96E+02	1.37E+00	1.72E+02	1.67E+00	1.23E+02	1.96E+00	8.54E+01	2.26E+00	6.18E+01
1.08E+00	1.96E+02	1.38E+00	1.71E+02	1.67E+00	1.22E+02	1.97E+00	8.50E+01	2.26E+00	6.15E+01
1.09E+00	1.97E+02	1.38E+00	1.71E+02	1.68E+00	1.22E+02	1.97E+00	8.45E+01	2.27E+00	6.11E+01
1.09E+00	1.97E+02	1.39E+00	1.70E+02	1.68E+00	1.21E+02	1.98E+00	8.40E+01	2.27E+00	6.08E+01
1.10E+00	1.97E+02	1.39E+00	1.69E+02	1.69E+00	1.20E+02	1.98E+00	8.35E+01	2.28E+00	6.05E+01
1.10E+00	1.97E+02	1.40E+00	1.68E+02	1.69E+00	1.19E+02	1.99E+00	8.30E+01	2.28E+00	6.02E+01
1.11E+00	1.97E+02	1.40E+00	1.68E+02	1.70E+00	1.18E+02	1.99E+00	8.26E+01	2.29E+00	5.99E+01
1.11E+00	1.97E+02	1.41E+00	1.67E+02	1.70E+00	1.18E+02	2.00E+00	8.21E+01	2.29E+00	5.96E+01
1.12E+00	1.97E+02	1.41E+00	1.66E+02	1.71E+00	1.17E+02	2.00E+00	8.16E+01	2.30E+00	5.93E+01
1.12E+00	1.97E+02	1.42E+00	1.65E+02	1.71E+00	1.16E+02	2.01E+00	8.12E+01	2.30E+00	5.90E+01
1.13E+00	1.97E+02	1.42E+00	1.64E+02	1.72E+00	1.15E+02	2.01E+00	8.07E+01	2.31E+00	5.87E+01
1.13E+00	1.97E+02	1.43E+00	1.64E+02	1.72E+00	1.15E+02	2.02E+00	8.03E+01	2.31E+00	5.84E+01
1.14E+00	1.96E+02	1.43E+00	1.63E+02	1.73E+00	1.14E+02	2.02E+00	7.98E+01	2.32E+00	5.82E+01
1.14E+00	1.96E+02	1.44E+00	1.62E+02	1.73E+00	1.13E+02	2.03E+00	7.94E+01	2.32E+00	5.79E+01
1.15E+00	1.96E+02	1.44E+00	1.61E+02	1.74E+00	1.13E+02	2.03E+00	7.89E+01	2.33E+00	5.76E+01
1.15E+00	1.95E+02	1.45E+00	1.60E+02	1.74E+00	1.12E+02	2.04E+00	7.85E+01	2.33E+00	5.73E+01
1.16E+00	1.95E+02	1.45E+00	1.60E+02	1.75E+00	1.11E+02	2.04E+00	7.80E+01	2.34E+00	5.71E+01
1.16E+00	1.95E+02	1.46E+00	1.59E+02	1.75E+00	1.10E+02	2.05E+00	7.76E+01	2.34E+00	5.68E+01
1.17E+00	1.94E+02	1.46E+00	1.58E+02	1.76E+00	1.10E+02	2.05E+00	7.72E+01	2.35E+00	5.65E+01
1.17E+00	1.94E+02	1.47E+00	1.57E+02	1.76E+00	1.09E+02	2.06E+00	7.67E+01	2.35E+00	5.63E+01
1.18E+00	1.93E+02	1.47E+00	1.56E+02	1.77E+00	1.08E+02	2.06E+00	7.63E+01	2.36E+00	5.60E+01
1.18E+00	1.93E+02	1.48E+00	1.55E+02	1.77E+00	1.08E+02	2.07E+00	7.59E+01	2.36E+00	5.58E+01
1.19E+00	1.92E+02	1.48E+00	1.55E+02	1.78E+00	1.07E+02	2.07E+00	7.55E+01	2.37E+00	5.55E+01
1.19E+00	1.92E+02	1.49E+00	1.54E+02	1.78E+00	1.06E+02	2.08E+00	7.51E+01

D.2 Valores de y^+ para 56 l/s

Tabela D.5: Valores de y^+ na soleira para 56 l/s e malha 4.

x (m)	y +	x (m)	y +	x (m)	y +	x (m)	y +
-4.98E-01	7.08E+01	-3.73E-01	7.10E+01	-2.48E-01	7.64E+01	-1.23E-01	8.09E+01
-4.95E-01	6.97E+01	-3.70E-01	7.12E+01	-2.45E-01	7.64E+01	-1.20E-01	8.12E+01
-4.92E-01	6.89E+01	-3.67E-01	7.14E+01	-2.42E-01	7.65E+01	-1.17E-01	8.14E+01
-4.89E-01	6.83E+01	-3.64E-01	7.16E+01	-2.39E-01	7.66E+01	-1.14E-01	8.17E+01
-4.86E-01	6.79E+01	-3.61E-01	7.18E+01	-2.36E-01	7.67E+01	-1.11E-01	8.20E+01
-4.83E-01	6.75E+01	-3.58E-01	7.20E+01	-2.33E-01	7.67E+01	-1.08E-01	8.23E+01
-4.80E-01	6.72E+01	-3.55E-01	7.22E+01	-2.30E-01	7.68E+01	-1.05E-01	8.26E+01
-4.77E-01	6.70E+01	-3.52E-01	7.24E+01	-2.27E-01	7.69E+01	-1.02E-01	8.29E+01
-4.73E-01	6.68E+01	-3.48E-01	7.26E+01	-2.23E-01	7.69E+01	-9.84E-02	8.33E+01
-4.70E-01	6.67E+01	-3.45E-01	7.27E+01	-2.20E-01	7.70E+01	-9.53E-02	8.37E+01
-4.67E-01	6.66E+01	-3.42E-01	7.29E+01	-2.17E-01	7.71E+01	-9.22E-02	8.40E+01
-4.64E-01	6.66E+01	-3.39E-01	7.31E+01	-2.14E-01	7.72E+01	-8.91E-02	8.45E+01
-4.61E-01	6.65E+01	-3.36E-01	7.32E+01	-2.11E-01	7.72E+01	-8.59E-02	8.49E+01
-4.58E-01	6.65E+01	-3.33E-01	7.34E+01	-2.08E-01	7.73E+01	-8.28E-02	8.54E+01
-4.55E-01	6.66E+01	-3.30E-01	7.36E+01	-2.05E-01	7.74E+01	-7.97E-02	8.59E+01
-4.52E-01	6.66E+01	-3.27E-01	7.37E+01	-2.02E-01	7.75E+01	-7.66E-02	8.64E+01
-4.48E-01	6.67E+01	-3.23E-01	7.39E+01	-1.98E-01	7.76E+01	-7.34E-02	8.69E+01
-4.45E-01	6.68E+01	-3.20E-01	7.40E+01	-1.95E-01	7.76E+01	-7.03E-02	8.75E+01
-4.42E-01	6.69E+01	-3.17E-01	7.41E+01	-1.92E-01	7.77E+01	-6.72E-02	8.81E+01
-4.39E-01	6.70E+01	-3.14E-01	7.43E+01	-1.89E-01	7.78E+01	-6.41E-02	8.88E+01
-4.36E-01	6.72E+01	-3.11E-01	7.44E+01	-1.86E-01	7.79E+01	-6.09E-02	8.95E+01
-4.33E-01	6.73E+01	-3.08E-01	7.45E+01	-1.83E-01	7.80E+01	-5.78E-02	9.02E+01
-4.30E-01	6.75E+01	-3.05E-01	7.47E+01	-1.80E-01	7.81E+01	-5.47E-02	9.10E+01
-4.27E-01	6.76E+01	-3.02E-01	7.48E+01	-1.77E-01	7.82E+01	-5.16E-02	9.19E+01
-4.23E-01	6.78E+01	-2.98E-01	7.49E+01	-1.73E-01	7.83E+01	-4.84E-02	9.28E+01
-4.20E-01	6.80E+01	-2.95E-01	7.50E+01	-1.70E-01	7.84E+01	-4.53E-02	9.38E+01
-4.17E-01	6.82E+01	-2.92E-01	7.51E+01	-1.67E-01	7.85E+01	-4.22E-02	9.48E+01
-4.14E-01	6.84E+01	-2.89E-01	7.52E+01	-1.64E-01	7.87E+01	-3.91E-02	9.59E+01
-4.11E-01	6.86E+01	-2.86E-01	7.53E+01	-1.61E-01	7.88E+01	-3.59E-02	9.72E+01
-4.08E-01	6.88E+01	-2.83E-01	7.54E+01	-1.58E-01	7.89E+01	-3.28E-02	9.85E+01
-4.05E-01	6.90E+01	-2.80E-01	7.55E+01	-1.55E-01	7.91E+01	-2.97E-02	1.00E+02
-4.02E-01	6.92E+01	-2.77E-01	7.56E+01	-1.52E-01	7.92E+01	-2.66E-02	1.02E+02
-3.98E-01	6.94E+01	-2.73E-01	7.57E+01	-1.48E-01	7.94E+01	-2.34E-02	1.03E+02
-3.95E-01	6.96E+01	-2.70E-01	7.58E+01	-1.45E-01	7.95E+01	-2.03E-02	1.05E+02
-3.92E-01	6.98E+01	-2.67E-01	7.59E+01	-1.42E-01	7.97E+01	-1.72E-02	1.08E+02
-3.89E-01	7.00E+01	-2.64E-01	7.60E+01	-1.39E-01	7.99E+01	-1.41E-02	1.10E+02
-3.86E-01	7.02E+01	-2.61E-01	7.60E+01	-1.36E-01	8.01E+01	-1.09E-02	1.13E+02
-3.83E-01	7.04E+01	-2.58E-01	7.61E+01	-1.33E-01	8.03E+01	-7.81E-03	1.17E+02
-3.80E-01	7.06E+01	-2.55E-01	7.62E+01	-1.30E-01	8.05E+01	-4.69E-03	1.22E+02
-3.77E-01	7.08E+01	-2.52E-01	7.63E+01	-1.27E-01	8.07E+01	-1.56E-03	1.29E+02

Tabela D.6: Valores de y^+ no início da bacia para 56 l/s e malha 4.

x (m)	y +	x (m)	y +	x (m)	y +	x (m)	y +	x (m)	y +
9.03E-01	6.76E+01	1.32E+00	2.26E+02	1.74E+00	1.40E+02	2.16E+00	8.55E+01	2.58E+00	7.76E+01
9.09E-01	1.15E+02	1.33E+00	2.25E+02	1.75E+00	1.38E+02	2.17E+00	8.51E+01	2.58E+00	7.76E+01
9.16E-01	1.51E+02	1.33E+00	2.24E+02	1.75E+00	1.37E+02	2.17E+00	8.48E+01	2.59E+00	7.77E+01
9.22E-01	1.69E+02	1.34E+00	2.23E+02	1.76E+00	1.36E+02	2.18E+00	8.44E+01	2.60E+00	7.77E+01
9.28E-01	1.74E+02	1.35E+00	2.22E+02	1.77E+00	1.35E+02	2.18E+00	8.41E+01	2.60E+00	7.77E+01
9.34E-01	1.67E+02	1.35E+00	2.21E+02	1.77E+00	1.33E+02	2.19E+00	8.38E+01	2.61E+00	7.77E+01
9.41E-01	1.49E+02	1.36E+00	2.20E+02	1.78E+00	1.32E+02	2.20E+00	8.34E+01	2.62E+00	7.77E+01
9.47E-01	1.24E+02	1.37E+00	2.19E+02	1.78E+00	1.31E+02	2.20E+00	8.31E+01	2.62E+00	7.78E+01
9.53E-01	9.46E+01	1.37E+00	2.18E+02	1.79E+00	1.30E+02	2.21E+00	8.28E+01	2.63E+00	7.78E+01
9.59E-01	6.08E+01	1.38E+00	2.17E+02	1.80E+00	1.29E+02	2.22E+00	8.26E+01	2.63E+00	7.78E+01
9.66E-01	2.15E+01	1.38E+00	2.16E+02	1.80E+00	1.27E+02	2.22E+00	8.23E+01	2.64E+00	7.78E+01
9.72E-01	2.82E+01	1.39E+00	2.15E+02	1.81E+00	1.26E+02	2.23E+00	8.20E+01	2.65E+00	7.79E+01
9.78E-01	6.34E+01	1.40E+00	2.14E+02	1.82E+00	1.25E+02	2.23E+00	8.18E+01	2.65E+00	7.79E+01
9.84E-01	9.29E+01	1.40E+00	2.13E+02	1.82E+00	1.24E+02	2.24E+00	8.15E+01	2.66E+00	7.79E+01
9.91E-01	1.19E+02	1.41E+00	2.12E+02	1.83E+00	1.23E+02	2.25E+00	8.13E+01	2.67E+00	7.79E+01
9.97E-01	1.41E+02	1.42E+00	2.11E+02	1.83E+00	1.22E+02	2.25E+00	8.11E+01	2.67E+00	7.80E+01
1.00E+00	1.61E+02	1.42E+00	2.09E+02	1.84E+00	1.21E+02	2.26E+00	8.08E+01	2.68E+00	7.80E+01
1.01E+00	1.78E+02	1.43E+00	2.08E+02	1.85E+00	1.20E+02	2.27E+00	8.06E+01	2.68E+00	7.80E+01
1.02E+00	1.93E+02	1.43E+00	2.07E+02	1.85E+00	1.19E+02	2.27E+00	8.04E+01	2.69E+00	7.81E+01
1.02E+00	2.06E+02	1.44E+00	2.06E+02	1.86E+00	1.18E+02	2.28E+00	8.03E+01	2.70E+00	7.81E+01
1.03E+00	2.17E+02	1.45E+00	2.05E+02	1.87E+00	1.17E+02	2.28E+00	8.01E+01	2.70E+00	7.81E+01
1.03E+00	2.25E+02	1.45E+00	2.03E+02	1.87E+00	1.16E+02	2.29E+00	7.99E+01	2.71E+00	7.81E+01
1.04E+00	2.33E+02	1.46E+00	2.02E+02	1.88E+00	1.15E+02	2.30E+00	7.98E+01	2.72E+00	7.82E+01
1.05E+00	2.39E+02	1.47E+00	2.01E+02	1.88E+00	1.14E+02	2.30E+00	7.96E+01	2.72E+00	7.82E+01
1.05E+00	2.43E+02	1.47E+00	1.99E+02	1.89E+00	1.13E+02	2.31E+00	7.95E+01	2.73E+00	7.82E+01
1.06E+00	2.47E+02	1.48E+00	1.98E+02	1.90E+00	1.12E+02	2.32E+00	7.93E+01	2.73E+00	7.83E+01
1.07E+00	2.50E+02	1.48E+00	1.96E+02	1.90E+00	1.11E+02	2.32E+00	7.92E+01	2.74E+00	7.83E+01
1.07E+00	2.52E+02	1.49E+00	1.95E+02	1.91E+00	1.10E+02	2.33E+00	7.91E+01	2.75E+00	7.83E+01
1.08E+00	2.53E+02	1.50E+00	1.94E+02	1.92E+00	1.09E+02	2.33E+00	7.90E+01	2.75E+00	7.84E+01
1.08E+00	2.55E+02	1.50E+00	1.92E+02	1.92E+00	1.08E+02	2.34E+00	7.89E+01	2.76E+00	7.84E+01
1.09E+00	2.55E+02	1.51E+00	1.91E+02	1.93E+00	1.08E+02	2.35E+00	7.88E+01	2.77E+00	7.84E+01
1.10E+00	2.56E+02	1.52E+00	1.89E+02	1.93E+00	1.07E+02	2.35E+00	7.87E+01	2.77E+00	7.85E+01
1.10E+00	2.56E+02	1.52E+00	1.88E+02	1.94E+00	1.06E+02	2.36E+00	7.86E+01	2.78E+00	7.85E+01
1.11E+00	2.56E+02	1.53E+00	1.87E+02	1.95E+00	1.05E+02	2.37E+00	7.85E+01	2.78E+00	7.85E+01
1.12E+00	2.56E+02	1.53E+00	1.85E+02	1.95E+00	1.04E+02	2.37E+00	7.84E+01	2.79E+00	7.86E+01
1.12E+00	2.55E+02	1.54E+00	1.84E+02	1.96E+00	1.04E+02	2.38E+00	7.83E+01	2.80E+00	7.86E+01
1.13E+00	2.55E+02	1.55E+00	1.82E+02	1.97E+00	1.03E+02	2.38E+00	7.83E+01	2.80E+00	7.86E+01
1.13E+00	2.54E+02	1.55E+00	1.81E+02	1.97E+00	1.02E+02	2.39E+00	7.82E+01	2.81E+00	7.87E+01
1.14E+00	2.54E+02	1.56E+00	1.80E+02	1.98E+00	1.01E+02	2.40E+00	7.81E+01	2.82E+00	7.87E+01
1.15E+00	2.53E+02	1.57E+00	1.78E+02	1.98E+00	1.01E+02	2.40E+00	7.81E+01	2.82E+00	7.87E+01
1.15E+00	2.52E+02	1.57E+00	1.77E+02	1.99E+00	9.99E+01	2.41E+00	7.80E+01	2.83E+00	7.88E+01
1.16E+00	2.51E+02	1.58E+00	1.75E+02	2.00E+00	9.92E+01	2.42E+00	7.80E+01	2.83E+00	7.88E+01
1.17E+00	2.51E+02	1.58E+00	1.74E+02	2.00E+00	9.85E+01	2.42E+00	7.79E+01	2.84E+00	7.88E+01
1.17E+00	2.50E+02	1.59E+00	1.72E+02	2.01E+00	9.79E+01	2.43E+00	7.79E+01	2.85E+00	7.89E+01
1.18E+00	2.49E+02	1.60E+00	1.71E+02	2.02E+00	9.72E+01	2.43E+00	7.78E+01	2.85E+00	7.89E+01
1.18E+00	2.48E+02	1.60E+00	1.70E+02	2.02E+00	9.66E+01	2.44E+00	7.78E+01	2.86E+00	7.89E+01
1.19E+00	2.47E+02	1.61E+00	1.68E+02	2.03E+00	9.60E+01	2.45E+00	7.78E+01	2.87E+00	7.89E+01
1.20E+00	2.46E+02	1.62E+00	1.67E+02	2.03E+00	9.53E+01	2.45E+00	7.77E+01	2.87E+00	7.90E+01
1.20E+00	2.45E+02	1.62E+00	1.65E+02	2.04E+00	9.47E+01	2.46E+00	7.77E+01	2.88E+00	7.90E+01
1.21E+00	2.44E+02	1.63E+00	1.64E+02	2.05E+00	9.42E+01	2.47E+00	7.77E+01	2.88E+00	7.90E+01
1.22E+00	2.44E+02	1.63E+00	1.63E+02	2.05E+00	9.36E+01	2.47E+00	7.77E+01	2.89E+00	7.91E+01
1.22E+00	2.43E+02	1.64E+00	1.61E+02	2.06E+00	9.30E+01	2.48E+00	7.76E+01	2.90E+00	7.91E+01
1.23E+00	2.42E+02	1.65E+00	1.60E+02	2.07E+00	9.25E+01	2.48E+00	7.76E+01	2.90E+00	7.91E+01
1.23E+00	2.40E+02	1.65E+00	1.58E+02	2.07E+00	9.19E+01	2.49E+00	7.76E+01	2.91E+00	7.91E+01
1.24E+00	2.39E+02	1.66E+00	1.57E+02	2.08E+00	9.14E+01	2.50E+00	7.76E+01	2.92E+00	7.92E+01
1.25E+00	2.38E+02	1.67E+00	1.56E+02	2.08E+00	9.09E+01	2.50E+00	7.76E+01	2.92E+00	7.92E+01
1.25E+00	2.37E+02	1.67E+00	1.54E+02	2.09E+00	9.04E+01	2.51E+00	7.76E+01	2.93E+00	7.92E+01
1.26E+00	2.36E+02	1.68E+00	1.53E+02	2.10E+00	8.99E+01	2.52E+00	7.76E+01	2.93E+00	7.92E+01
1.27E+00	2.35E+02	1.68E+00	1.52E+02	2.10E+00	8.94E+01	2.52E+00	7.76E+01	2.94E+00	7.93E+01
1.27E+00	2.34E+02	1.69E+00	1.50E+02	2.11E+00	8.89E+01	2.53E+00	7.76E+01	2.95E+00	7.93E+01
1.28E+00	2.33E+02	1.70E+00	1.49E+02	2.12E+00	8.85E+01	2.53E+00	7.76E+01	2.95E+00	7.93E+01
1.28E+00	2.32E+02	1.70E+00	1.48E+02	2.12E+00	8.80E+01	2.54E+00	7.76E+01	2.96E+00	7.93E+01
1.29E+00	2.31E+02	1.71E+00	1.46E+02	2.13E+00	8.76E+01	2.55E+00	7.76E+01	2.97E+00	7.94E+01
1.30E+00	2.30E+02	1.72E+00	1.45E+02	2.13E+00	8.71E+01	2.55E+00	7.76E+01	2.97E+00	7.94E+01
1.30E+00	2.29E+02	1.72E+00	1.44E+02	2.14E+00	8.67E+01	2.56E+00	7.76E+01	2.98E+00	7.94E+01
1.31E+00	2.28E+02	1.73E+00	1.42E+02	2.15E+00	8.63E+01	2.57E+00	7.76E+01	2.98E+00	7.94E+01
1.32E+00	2.27E+02	1.73E+00	1.41E+02	2.15E+00	8.59E+01	2.57E+00	7.76E+01	2.99E+00	...

Anexo E

Ressalto hidráulico

As Figs. E.1 a E.5 apresentam a propagação, de jusante para montante, do ressalto hidráulico na bacia de dissipação, em vários instantes de tempo. Estes resultados referem-se a $Q=35$ l/s e malha 5. Verifica-se que o ressalto, ao atingir o pé do descarregador, mantém-se localizado nesta secção, sem submergir para os degraus. Observa-se também que a quantidade de ar no ressalto vai aumentando com o tempo.

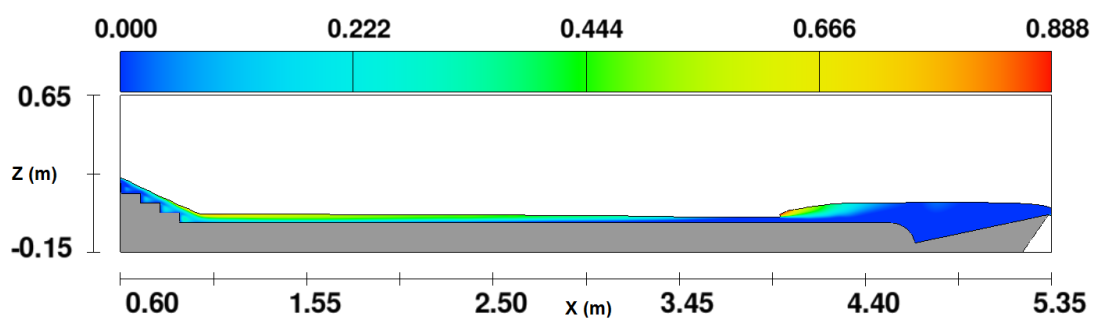


Figura E.1: Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t=22$ s.

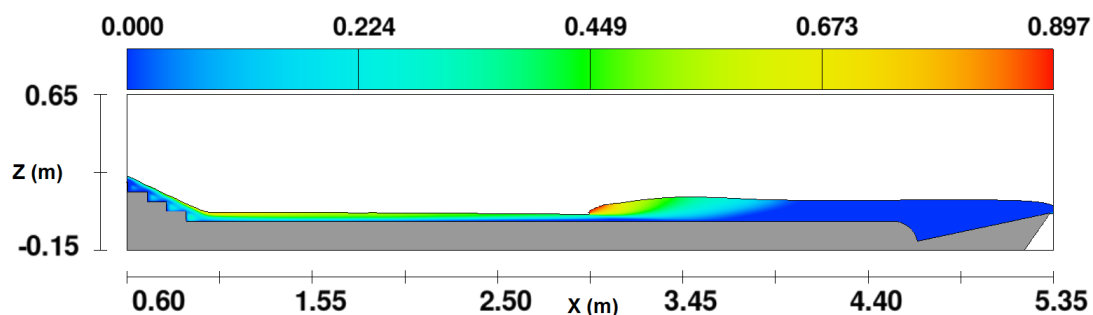


Figura E.2: Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t=33$ s.

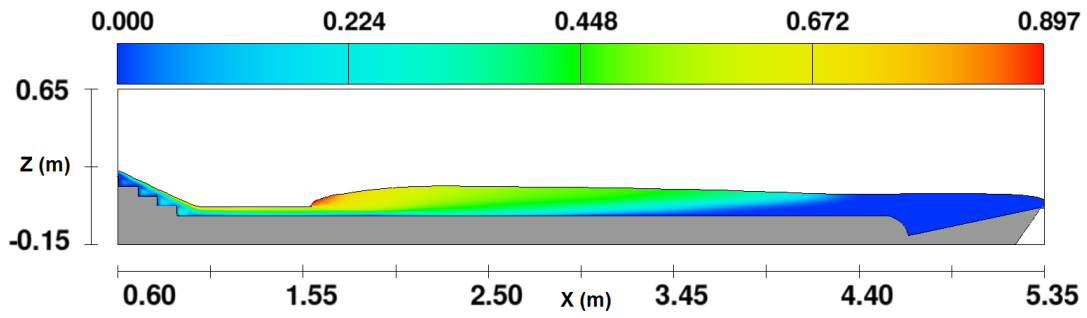


Figura E.3: Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t= 54s$.

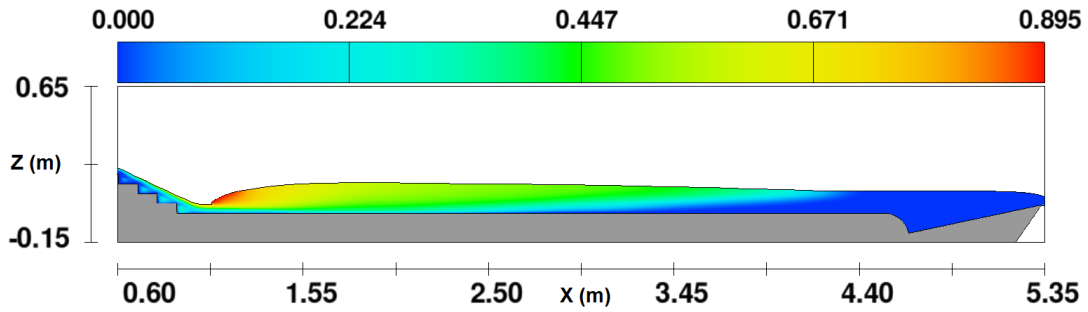


Figura E.4: Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t= 77s$.

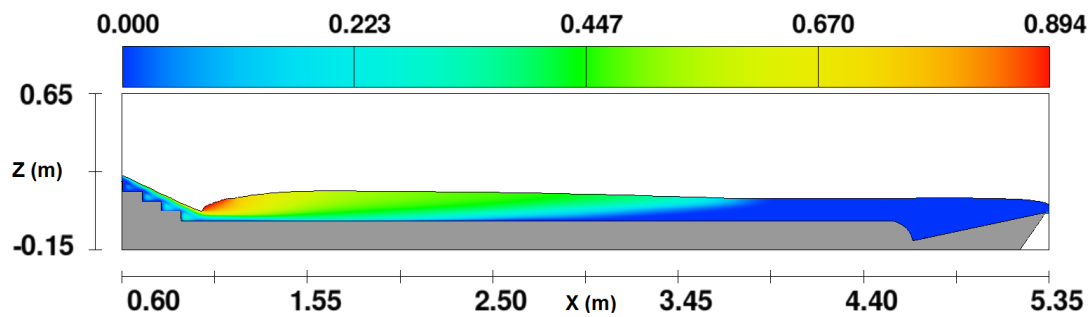


Figura E.5: Campo de concentração de ar na bacia de dissipação para $t= 100s$.

Na Fig. E.6, apresentam-se os valores do número de Froude no ressalto, que indicam a passagem do regime rápido para lento.

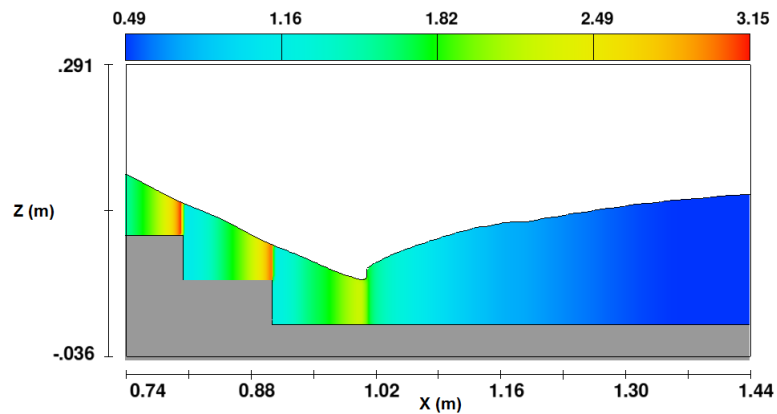


Figura E.6: Número de Froude do escoamento na proximidade do ressalto hidráulico.

Anexo F

Perfis de velocidade na soleira descarregadora para $Q=35$ l/s e $Q=42$ l/s

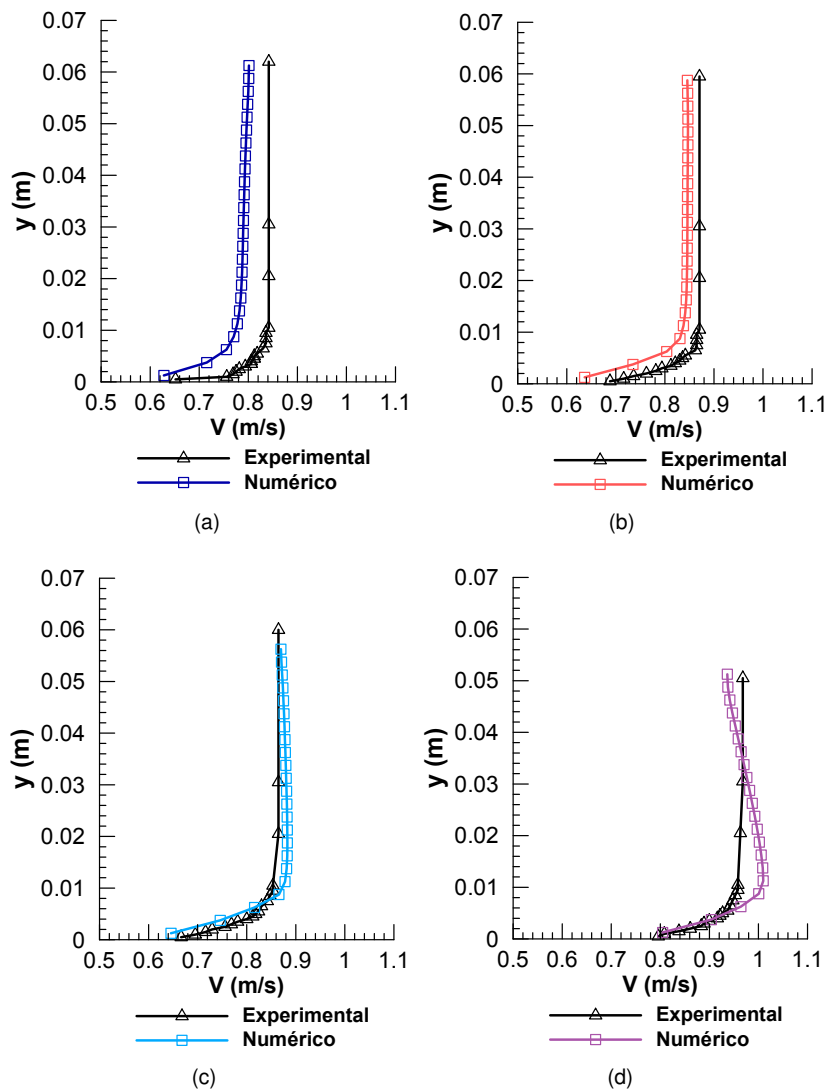


Figura F.1: Comparação entre perfis experimentais e numéricos na soleira descarregadora para $Q=35$ l/s e malha 4: (a) secção 1; (b) secção 2; (c) secção 3; (d) secção 4.

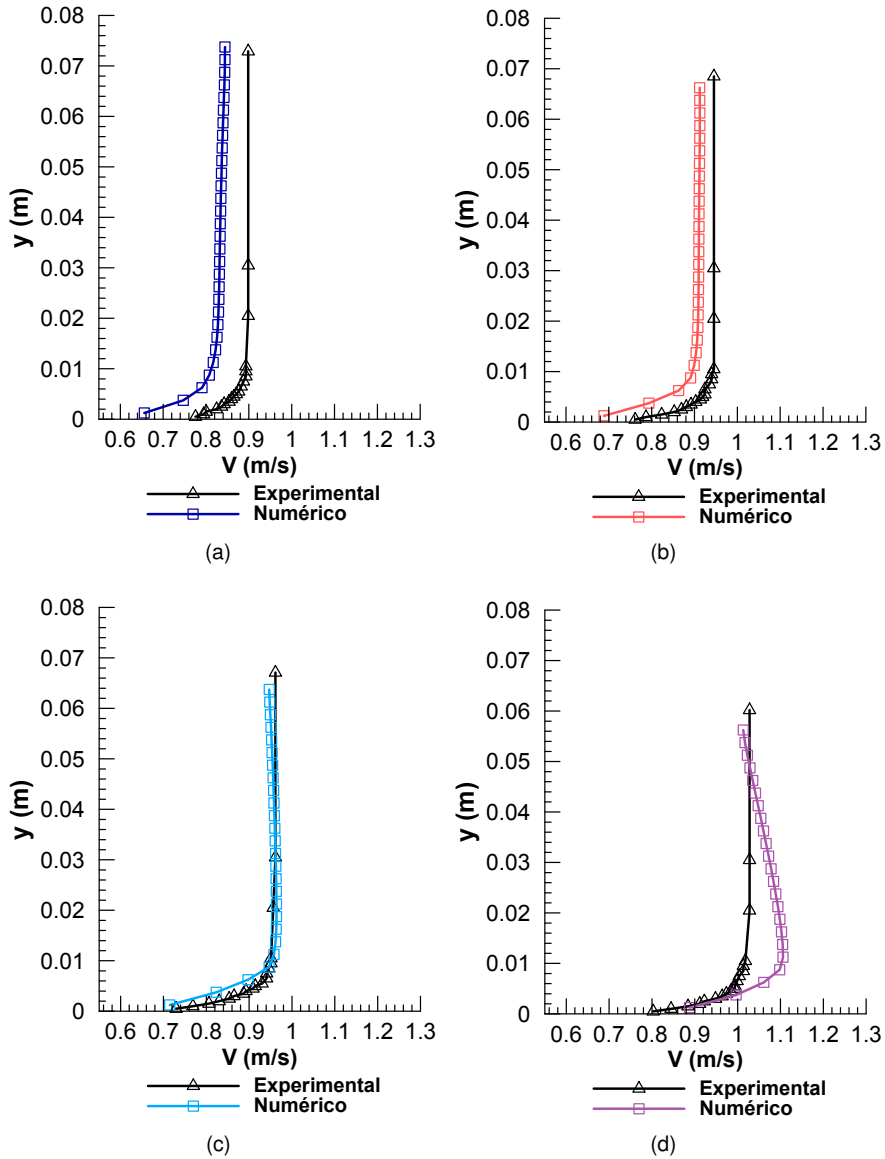
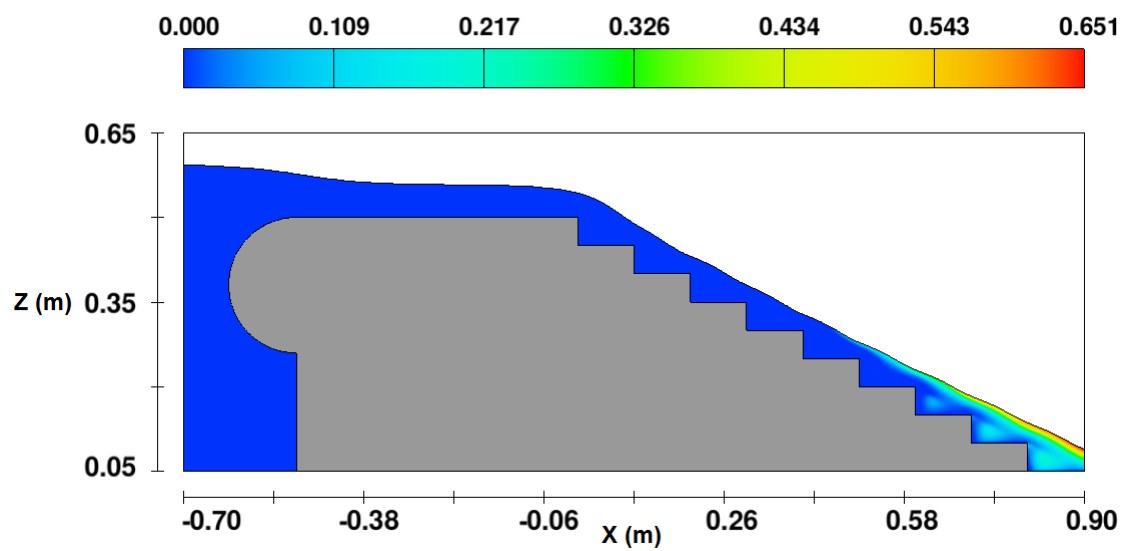


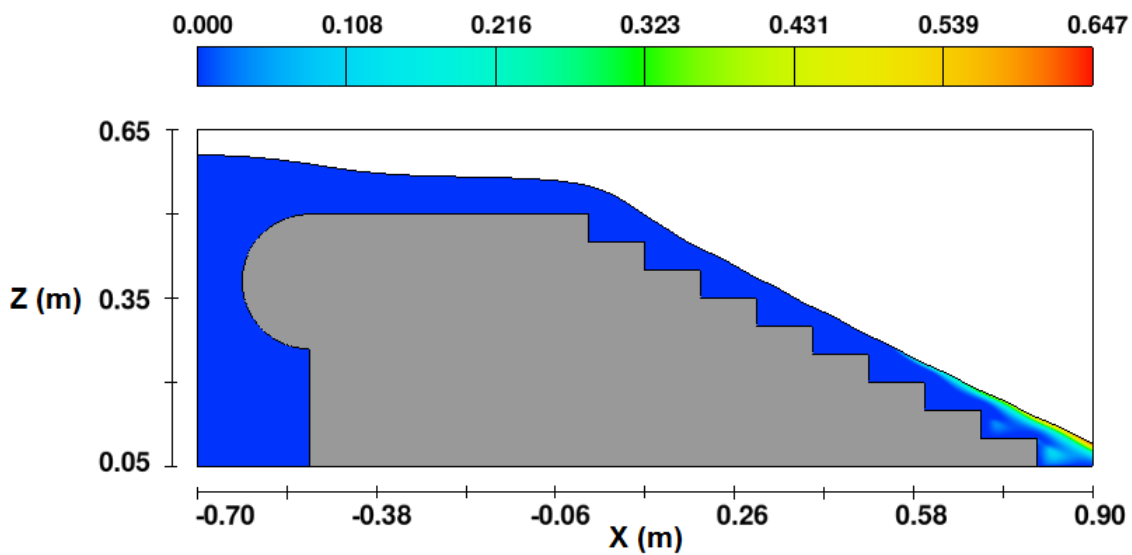
Figura F.2: Comparação entre perfis experimentais e numéricos na soleira descarregadora para $Q=42$ l/s e malha 4: (a) secção 1; (b) secção 2; (c) secção 3; (d) secção 4.

Anexo G

Concentração de ar no canal descarregador

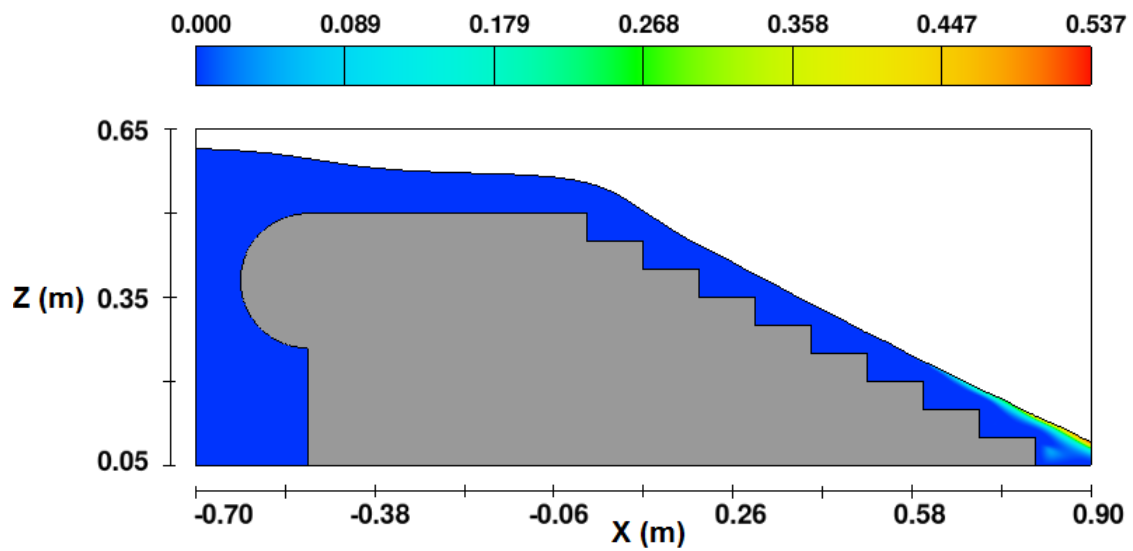


(a)

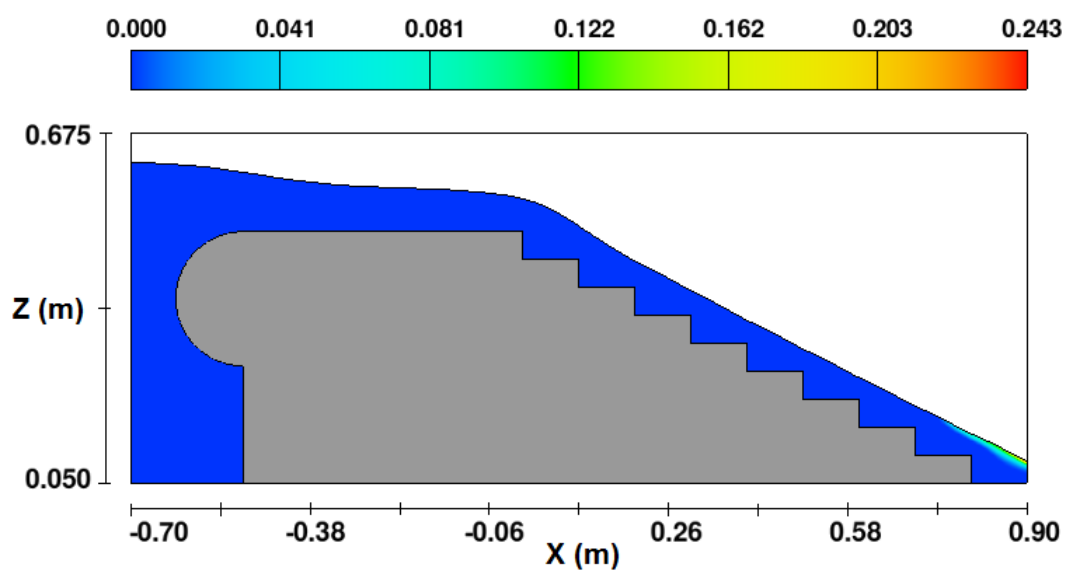


(b)

Figura G.1: Concentração de ar: (a) $Q=35$ l/s e malha 5; (b) $Q=42$ l/s e malha 5; (c) $Q=49$ l/s e malha 5; (d) $Q=56$ l/s e malha 4.



(c)



(d)

Figura G.1: Concentração de ar: (a) $Q=35$ l/s e malha 5; (b) $Q=42$ l/s e malha 5; (c) $Q=49$ l/s e malha 5; (d) $Q=56$ l/s e malha 4 (continuação).

Anexo H

Perfis de velocidade no canal descarregador para $Q=35$ l/s

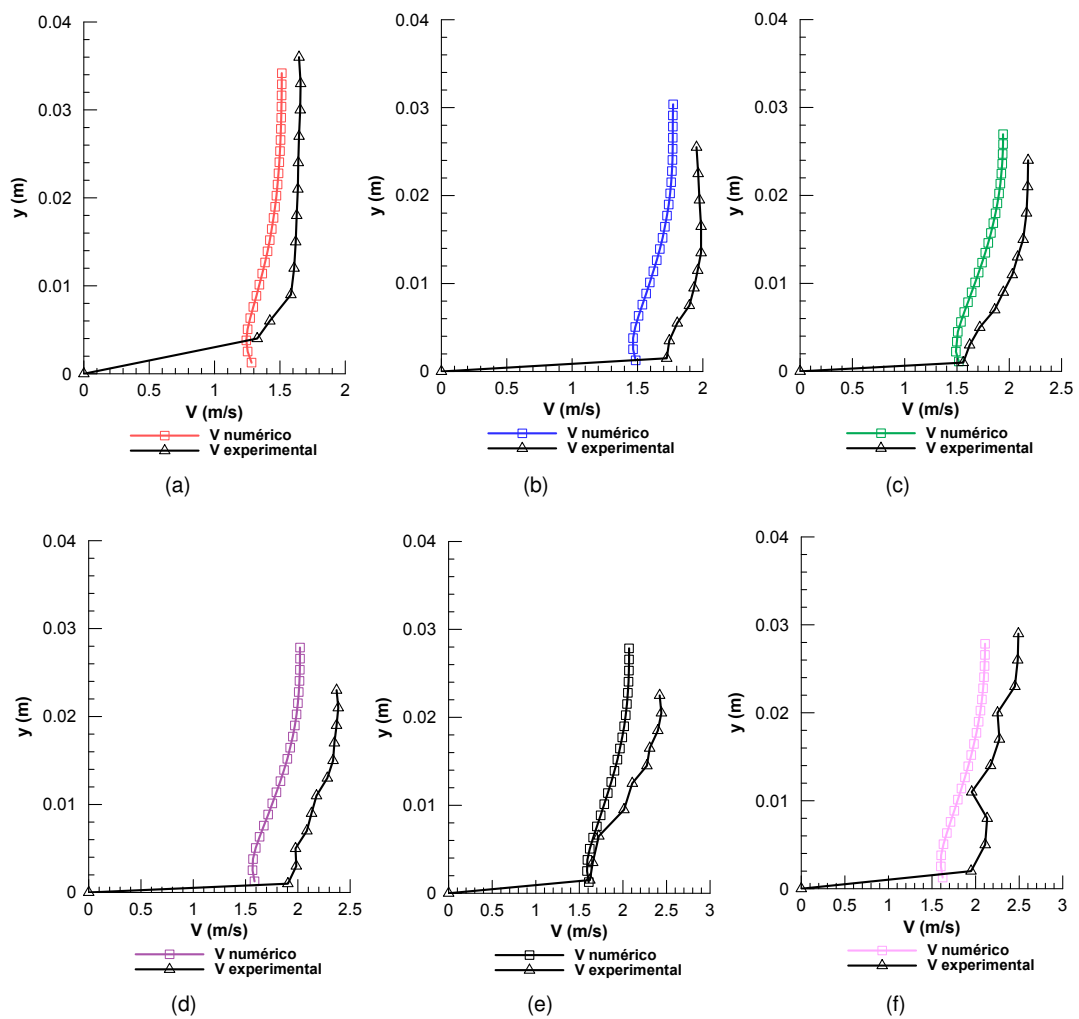


Figura H.1: Comparação entre perfis de velocidade experimentais e numéricos no canal descarregador para $Q=35$ l/s e malha 5: (a) vertical 2; (b) vertical 3; (c) vertical 4; (d) vertical 5; (e) vertical 6; (f) vertical 7.