

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

**ANÁLISE DA MACROTURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO EM ESCADAS PARA
PEIXES POR BACIAS SUCESSIVAS**

DANIELA GUZZON SANAGIOTTO

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Marcelo Giulian Marques
Co-orientador: Luiz Augusto Magalhães Endres
Orientadores no Estágio de Doutorado no Exterior:
Antônio Alberto do Nascimento Pinheiro (IST/UTL)
José Falcão de Melo (LNEC)

Porto Alegre, novembro, 2007.

Dedico este trabalho aos meus pais:

João Danilo e Teda Maria.

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e co-orientado pelo Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres da mesma instituição. Durante o período de doutorado foi realizado um estágio de doutorado no exterior, com a orientação do Dr. António Pinheiro do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa e do Dr. José Falcão de Melo do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer às instituições que possibilitaram todo o andamento e realização do trabalho:

À CAPES, pela concessão da minha bolsa de doutorado;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, particularmente ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e

Ao Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa e ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Lisboa) que me acolheram durante o período de estágio de doutoramento.

Desejo agradecer a todas as pessoas que de alguma forma auxiliaram na realização desta tese, seja através da orientação técnica e científica, seja através de apoio, do incentivo e da amizade.

Ao meu orientador, Prof. Marcelo Giulian Marques, pelo incentivo, motivação, atenção e amizade.

Ao meu co-orientador, Prof. Luis Augusto Magalhães Endres, pelos conselhos e sugestões.

Aos orientadores portugueses durante o período de estágio de doutoramento: Prof. Dr. António Alberto Nascimento Pinheiro e Dr. José Falcão de Melo, que me acolheram com muita atenção e sempre estiveram dispostos a contribuir com o trabalho.

Aos professores do PPGRHSA/IPH que contribuíram para a minha formação.

Aos colegas e amigos do pavilhão marítimo, especialmente Janaine Zanella Coletti, Cristiane Battiston, Jaime Gomes e Alexandre Mees.

Aos bolsistas de iniciação científica Emanuele, Rosaura e Flora, e aos hidrotécnicos: Maximiliano Messa, Sérgio Nicolau Flores, Sabrina Minhos e Esther, sem os quais o trabalho teria se tornado bem mais cansativo.

Ao engenheiro electricista Alexandre Mahler, que auxiliou na instalação experimental construída no IPH.

A todos os funcionários do IPH, especialmente Nadir e Márcia, por toda dedicação aos alunos do PPGRHSA.

Aos colegas e funcionários do Laboratório Nacional de Engenharia Civil que muito me auxiliaram, principalmente durante a realização dos ensaios, e me propiciaram um convívio muito agradável: Dr. Carlos Alberto Galvão, Sr. Guilhermino Lisboa, Eng^a. Maria da Graça Neves, Eng^a. Elsa Alves, Eng^a. Conceição Fortes, Eng. Alberto Pinto de Magalhães e Eng. João Soromenho Rocha.

Aos demais colegas portugueses: Ana Margarida Silva, António Relvas e Adolfo Franco pelo auxílio e receptividade.

Aos amigos que fiz em Lisboa: Mônica, Jorge, Carmelo, Elisa e Gorete, com os quais dividi muitas descobertas nessa cidade maravilhosa.

Aos demais amigos, que sabem que são importantes e que sempre estão prontos a me apoiar e incentivar.

E por fim, agradeço aos meus pais pelo apoio, dedicação e compreensão.

RESUMO

Os mecanismos de transposição de peixes (MTP) são estruturas ou sistemas que possibilitam a migração da ictiofauna entre as partes de jusante/montante/jusante de uma barragem. As escadas para peixes representam um dos tipos de MTP mais conhecidos no mundo e apresentam diversas configurações geométricas. A escolha do tipo de escada deve atender às características natatórias dos peixes selecionados para transporem o obstáculo. Para algumas espécies, como o salmão, já se conhecem geometrias adequadas, entretanto, para a maioria das espécies isto não ocorre e muitos projetos têm demonstrado desempenho insatisfatório.

No Brasil, encontra-se uma imensa diversidade de espécies de peixes, cujas características natatórias diferem em muito das apresentadas pelos salmonídeos. Este fato, associado à crescente exigência da implantação de MTP nos barramentos, através de leis estaduais ambientais, torna necessária a definição de estruturas adequadas à ictiofauna brasileira.

A validação dos critérios de projeto passa, obrigatoriamente, por estudos que avaliem as características hidráulicas das estruturas propostas e a interação do fluxo com os padrões natatórios da ictiofauna. O número de pesquisas relacionadas ao funcionamento hidráulico de escadas para peixes vem crescendo, entretanto ainda são insuficientes, não existindo um consenso sobre os critérios, seja para sua caracterização completa, seja para definir sobre quais parâmetros devem ser considerados. Os padrões de turbulência do escoamento em escadas para peixes, cujas características supõem-se relacionarem-se com o grau de aceitação ou rejeição das espécies, são praticamente desconhecidos.

Neste trabalho realizou-se a caracterização hidráulica através do estudo experimental, de três tipos de escadas para peixes: (1) com ranhura vertical; (2) com descarregador de superfície e (3) com orifício de fundo. As estruturas foram construídas nos laboratórios do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS e no Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC – Portugal.

As seguintes medições foram realizadas: velocidades em três direções, em diferentes planos dos tanques, com velocímetros acústicos Doppler (ADV) e níveis de água da superfície livre com pontas linimétricas e régua graduada. Para a estrutura com ranhura vertical ainda foram medidas as pressões médias e suas flutuações, junto ao fundo do canal, com transdutores piezoresistivos. Para cada uma das estruturas realizaram-se ensaios com três descargas.

Além de definidas as características médias do escoamento, os dados de velocidades, que passaram por um processo de aplicação de filtros sem substituição, possibilitaram a avaliação

de parâmetros de turbulência, entre eles a energia cinética da turbulência, a intensidade da turbulência e as tensões de Reynolds.

No modelo da escada para peixes com ranhuras verticais verificou-se que os parâmetros hidráulicos estão de acordo com estruturas similares da bibliografia, entre eles, coeficiente de descarga, vazão adimensional e coeficiente de cisalhamento. Os campos de pressão junto ao fundo refletem o comportamento da superfície livre do escoamento. Através do mapeamento das velocidades dentro do tanque da escada do tipo ranhura vertical, foi possível caracterizar as duas zonas de recirculação e a região do jato principal. Os máximos valores médios de velocidade encontram-se na seção da ranhura, não excedendo 1,00 m/s (no modelo).

Além disso, foi possível reconhecer as regiões de maior energia cinética da turbulência que apresentaram valores de até $1000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ na região do jato principal, as quais coincidem com as zonas de maiores tensões de Reynolds da ordem de até 30 N/m^2 . A partir das velocidades médias e em função das velocidades de nado dos peixes obtidos na literatura, foi possível a identificação de locais que atuam como “barreiras” ao deslocamento de determinada espécie. A avaliação qualitativa do comportamento da trajetória dos peixes dentro dos tanques mostrou-se de acordo com a definição destas “barreiras” hidráulicas e com a avaliação do comportamento dos campos de energia cinética da turbulência e das tensões de Reynolds.

No modelo da escada do tipo descarregador de superfície observaram-se as máximas velocidades médias sobre o descarregador, com valores de até 1,73 m/s. Verifica-se que na maior parte do tanque as velocidades médias não ultrapassam 40% da velocidade potencial. Foram encontrados valores de energia cinética da turbulência até $2000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, com valores na maior parte do tanque em torno de $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$. Quanto aos campos de tensões de Reynolds, têm-se, na maior parte do tanque, os valores entre -5 e 5 N/m^2 , sendo que na região do jato mergulhante, os valores chegam até 30 N/m^2 .

Na escada com orifícios de fundo verificaram-se as maiores velocidades médias nos planos sob influência do fluxo principal proveniente do orifício. Não foi possível a medição da velocidade na seção da abertura, sendo que os valores medidos no tanque não ultrapassaram 50% da velocidade potencial. Os máximos valores de energia cinética da turbulência atingem até $2000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ junto ao fundo, enquanto na região central do tanque, o valor médio é um pouco inferior a $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$. Os valores de tensão de Reynolds encontram-se entre -30 e 30 N/m^2 , com a maioria das regiões entre -5 e 5 N/m^2 .

Os valores máximos e médios de energia cinética da turbulência e tensões de Reynolds para os modelos com descarregador de superfície e com orifício de fundo encontram-se na mesma faixa. Isto indica que, sob o ponto de vista técnico, possivelmente o critério de escolha entre essas duas estruturas recai nas características da ictiofauna. A passagem com ranhura vertical

permite a escolha da profundidade preferencial de nado. No entanto, nessa estrutura, verifica-se que as componentes médias e turbulentas, nas regiões de descanso, comparando-as com os valores máximos do jato principal, são superiores proporcionalmente, às observadas nas zonas de recirculação das outras duas estruturas.

As informações biológicas disponíveis na literatura não permitem a definição de condições preferenciais em relação aos parâmetros de turbulência entre as estruturas aqui avaliadas. No entanto, as informações obtidas nesse trabalho indicam que a energia cinética da turbulência e as tensões de Reynolds podem ser indicativos da tolerância ou preferência dos peixes até certos níveis de turbulência.

Palavras-chave: mecanismos de transposição para peixes, escada para peixes, passagens para peixes, turbulência, ADV (velocímetro acústico Doppler), campos de velocidade, intensidade cinética da turbulência, tensões de Reynolds.

ABSTRACT

Fish facilities are structures or systems that enable fish passage through dams or obstructions. Fishways represent one of the most common fish facilities types worldwide, presenting different geometries and designs. The choice and design of these structures must attend the fish swimming performance and biological characteristics. For some species, as salmon, there are defined designs that can be successfully applied, however, that does not occur for the majority of the species and many projects have showed unsatisfactory efficiency.

In Brazil, there is an immense diversity of fish species, whose swimming characteristics are strongly different than the other known species like the salmons. This fact, associated with the increasing requirement of fish facilities implantation in dams, mainly through environmental State Laws, requires the definition of structures adapted to the Brazilian fish.

The design criteria validation needs, necessarily, studies to evaluate hydraulic characteristics on structure proposals and the interaction of the flow with swimming abilities. The number of researches related to the hydraulic functioning of fishways is increasing, however they are still insufficient and there is not a consensus on the criteria, either for its complete characterization, either to define which parameters should be considered. The flow turbulence patterns in fishways, whose characteristics are assumed to be related with the degree of acceptance or rejection of the species, are practically unknown.

In this study a hydraulic characterization was carried out through an experimental study, including three kinds of fishways: (1) with vertical slots; (2) with rectangular notches and (3) with bottom orifices. The facilities were set up in the Hydraulic Research Institute of the Federal University of Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) and in the National Laboratory of Civil Engineering – LNEC - Portugal.

The following measurements were carried out: three-direction velocities, in a 3D-mesh in one pool of each structure, with Acoustic Doppler Velocimeters and water level of the free surface with a point gauge and scales. In the vertical slot fishway it was carried out complementary measurements of pressure in the bottom of the channel, with transducers. For each structure three discharges were tested.

Besides defining the mean flow characteristics, the velocity time data, filtered (through a digital process) without substitution, allowed to analyze some turbulence parameters, as turbulence kinetic energy, turbulence intensity and Reynolds' shear stresses.

In the vertical slot fishway model it was verified that the hydraulic parameters are in agreement with similar structures of the literature, among them, discharge coefficient,

adimensional discharge and friction factor. The bottom pressure field agrees with the behavior of the free-surface flow. Two recirculation zones and the area of the main jet were characterized through the velocities distribution inside the vertical slot fishway pool. The maximum mean velocity values were found in the slot section, not exceeding 1.00 m/s (in the model).

Moreover, it was possible to recognize the areas with larger turbulence kinetic energy that presented values of up to 1000 cm²/s² in the main jet area, which correspond to the largest Reynolds' shear stresses values of up to 30 N/m². Considering mean velocities data and fish swimming capabilities, it was possible to identify regions that are insurmountable by the fish. The qualitative approach of the fish trajectory inside the structure agrees with the insurmountable regions described through mean velocities and with the distribution of turbulence kinetic energy and Reynolds' stresses.

In the fishway model with rectangular notches, the maximum mean velocities were observed on the weir, with values of up to 1.73 m/s. In the major part of the pool, mean velocities do not surpass 40% of the potential velocity. Values up to 2000 cm²/s² for turbulence kinetic energy were found, with values in the major part of the pool close to 200 cm²/s². For Reynolds' stresses, the major part of the structure works with values in the range of -5 and 5 N/m², and in the jet entrance pool region the values are of up to 30 N/m².

In the fishway with bottom orifices the largest mean velocities were verified in the plans under influence of the main flow connecting consecutive orifices. The measurement of the velocities in the orifice section was not possible and the values measured in the pool did not exceed 50% of the potential velocity. The maximum values of turbulence kinetic energy reached up to 2000 cm²/s² close to the bottom channel, while in the central area of the pool, the mean value is lower than 200 cm²/s². The values of Reynolds' shear stresses are between -30 and 30 N/m², with the major part between -5 and 5 N/m².

The maximum and mean values of turbulence kinetic energy and Reynolds' stresses in the models with rectangular notches and with orifice are in the same range. It indicates that the choice between these two structures relapses in the fish swimming characteristics. The passage with vertical slot allows the choice of the swimming depth preference. However, in the resting areas of this structure, it is verified that the mean and turbulent components when compared with the maximum values of the main jet, are higher proportionally, to the ones observed in the recirculation zones of the other two structures.

The biological information available in the literature does not allow the definition of preferential conditions in relation to the turbulence parameters among the structures here appraised. However, the information obtained in this work indicates that the turbulence

kinetic energy and Reynolds' shear stress can be indicatives of the tolerance or preference of the fish to certain turbulence levels.

Keywords: fishways, fish passage, fish ladders, turbulence, ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), velocity field, turbulent kinetic energy, Reynolds' shear stress.

SUMÁRIO

| | |
|--|-------|
| Apresentação | i |
| Agradecimentos | ii |
| Resumo | iv |
| Abstract..... | vii |
| Sumário..... | x |
| Lista de Tabelas | xiii |
| Lista de Figuras | xiv |
| Lista de Símbolos | xxiii |
| Capítulo 1 | 1 |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Motivação do Trabalho..... | 1 |
| 1.2. Objetivo Geral | 3 |
| 1.3. Objetivos Específicos | 3 |
| 1.4. Definição das Estruturas Estudadas..... | 4 |
| 1.5. Organização do Trabalho..... | 4 |
| Capítulo 2 | 6 |
| 2. Revisão Bibliográfica | 6 |
| 2.1 Introdução..... | 6 |
| 2.2 Revisão Histórica dos Mecanismos de Transposição de Peixes..... | 7 |
| 2.2.1 No Mundo..... | 7 |
| 2.2.2 No Brasil – Evolução Histórica..... | 8 |
| 2.3 Tipos de Mecanismos de Transposição de Peixes..... | 13 |
| 2.3.1 Escadas para Peixes ou Passagens para Peixes por Bacias Sucessivas | 14 |
| 2.3.1.1 Escadas com soleira vertedoura..... | 16 |
| 2.3.1.2. Escadas com orifícios | 21 |
| 2.3.1.3 Escadas com ranhuras verticais | 22 |
| 2.3.2 Passagens tipo Denil..... | 26 |
| 2.3.3 Rios Artificiais ou Canais Naturalizados..... | 27 |
| 2.3.4 Eclusas | 28 |
| 2.3.5 Elevadores para Peixes | 31 |
| 2.3.6 Captura, Transporte e Soltura..... | 34 |
| 2.3.8 Passagens para Enguias | 36 |
| 2.4 Partes de uma Passagem para Peixes..... | 37 |
| 2.4.1 Entrada..... | 38 |
| 2.4.2 O Canal de Transposição | 42 |
| 2.4.3 Saída | 43 |
| 2.5 A Passagem de Montante para Jusante..... | 43 |
| 2.6 Modelagem Física de Escadas para Peixes..... | 46 |
| 2.6.1 Semelhança, Análise Dimensional e Modelos Físicos..... | 46 |
| 2.6.2 Estudos em Modelos Reduzidos..... | 51 |
| 2.6.2.1 Avaliação da vazão adimensional..... | 57 |
| 2.6.2.2 Avaliação do coeficiente de descarga..... | 58 |
| 2.6.2.3 Avaliação da superfície livre do escoamento | 59 |
| 2.6.2.4 Avaliação de velocidades | 60 |
| 2.6.2.5 Avaliação em modelo reduzido do campo de pressões..... | 61 |
| 2.6.2.6 Avaliação da dissipação de energia..... | 62 |
| 2.6.2.7 Avaliação da turbulência do escoamento | 63 |
| 2.7 Aspectos Biológicos | 67 |
| 2.7.1. Introdução..... | 67 |

| | |
|--|-----|
| 2.7.2. O Processo da Migração e os Peixes | 68 |
| 2.7.3. Capacidade Natatória..... | 70 |
| 2.7.5. Influência da Turbulência do Escoamento no Comportamento dos Peixes | 77 |
| Capítulo 3 | 79 |
| 3. Instalação Experimental e Metodologia | 79 |
| 3.1 Planejamento dos Experimentos..... | 79 |
| 3.2 Estrutura A – IPH/UFRGS | 81 |
| 3.2.1 Instalação Experimental A..... | 81 |
| 3.2.2 Metodologia Experimental A | 84 |
| 3.2.2.1 Medição da profundidade do escoamento | 85 |
| 3.2.2.2. Medição de pressão | 86 |
| 3.2.2.3 Medição de velocidade | 88 |
| 3.3 Estrutura B – LNEC/IST-UTL | 93 |
| 3.3.1 Instalação Experimental B..... | 93 |
| 3.3.2 Ensaio Realizados | 96 |
| 3.3.3 Metodologia Experimental B | 97 |
| 3.3.3.1 Medição da lâmina d’água..... | 97 |
| 3.3.3.2 Medição de velocidade | 97 |
| Capítulo 4 | 101 |
| 4 Resultados e Discussão..... | 101 |
| 4.1 Introdução..... | 101 |
| 4.2 Estrutura A – MTP de Ranhura Vertical | 103 |
| 4.2.1 Parâmetros Hidráulicos | 103 |
| 4.2.1.1 Coeficiente de descarga | 103 |
| 4.2.1.2 Vazão adimensional..... | 104 |
| 4.2.1.3 Coeficiente de cisalhamento..... | 106 |
| 4.2.2 Profundidade do Escoamento | 106 |
| 4.2.3 Pressões no Fundo do Canal..... | 108 |
| 4.2.4 Velocidades e Turbulência | 111 |
| 4.2.4.1 Campos de velocidades médias | 112 |
| 4.2.4.2 Características gerais do escoamento | 128 |
| 4.2.4.3 Velocidades na região da ranhura..... | 129 |
| 4.2.4.4 Campos de energia cinética média | 137 |
| 4.2.4.5 Campos de energia cinética da turbulência | 141 |
| 4.2.4.6 Campos de intensidades da turbulência..... | 146 |
| 4.2.4.7 Campos de tensões de Reynolds..... | 150 |
| 4.2.5 Comportamento da Ictiofauna Associado às Características Hidráulicas | 154 |
| 4.2.6 Definição de Barreiras Hidráulicas..... | 161 |
| 4.3 Estrutura B1 – MTP com Descarregador de Superfície | 167 |
| 4.3.1 Coeficiente de Descarga | 167 |
| 4.3.2 Velocidades e Turbulência | 169 |
| 4.3.2.1 Campos de velocidades médias | 169 |
| 4.3.2.2 Características gerais do escoamento | 183 |
| 4.3.2.3 Campos de energia cinética média | 185 |
| 4.3.2.4 Campos de energia cinética da turbulência | 189 |
| 4.3.2.5 Campos de intensidades da turbulência..... | 193 |
| 4.3.2.6 Campos de tensões de Reynolds..... | 196 |
| 4.4 Estrutura B2– MTP com Orifício de Fundo | 201 |
| 4.4.1 Coeficiente de Descarga | 201 |
| 4.4.2 Velocidades e Turbulência | 202 |
| 4.4.2.1 Campos de velocidades médias | 202 |
| 4.4.2.2 Características gerais do escoamento | 217 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.2.3 Campos de energia cinética média | 219 |
| 4.4.2.4 Campos de energia cinética da turbulência | 222 |
| 4.4.2.5 Campos de intensidades da turbulência..... | 226 |
| 4.4.2.6 Campos de tensões de Reynolds..... | 229 |
| Capítulo 5 | 234 |
| 5 Conclusões..... | 234 |
| 5.1 Estrutura A – MTP de Ranhura Vertical | 234 |
| 5.2 Estrutura B1 – MTP com Descarregador de Superfície | 237 |
| 5.3 Estrutura B2– MTP com Orifício de Fundo | 238 |
| 5.4. Estudo Comparativo entre os MTP Testados | 239 |
| Capítulo 6 | 243 |
| 6 Sugestões para Trabalhos Futuros | 243 |
| Referências bibliográficas | 245 |
| Anexos | 256 |
| Anexo 1: Descrição Geral da UHE de Igarapava | 257 |
| Anexo 2: Medições com o ADV e Aplicação de Filtros aos Dados..... | 259 |
| A2.1 Revisão Bibliográfica sobre Velocímetros Acústicos Doppler (ADV)..... | 259 |
| A2.2 Definição dos Parâmetros de Ensaio | 264 |
| A2.3 Aplicação de Filtros aos Dados | 267 |
| A2.4 Configuração Utilizada nos Ensaios..... | 277 |
| Anexo 3: Avaliação da Influência do Comprimento da Conexão Tomada-transdutor | 279 |
| Anexo 4: Campos de Velocidades Médias Adimensionalizadas ($V_{xy}/\sqrt{2g\Delta h}$)..... | 282 |
| Anexo 5: Campos de Energia Cinética da Turbulência Adimensionalizada ($k^{0.5}/V_p$) | 288 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Alguns mecanismos de transposição de peixes no Brasil..... | 9 |
| Tabela 2.2 – Desnível e velocidades máximas admitidas para algumas espécies de peixes (Fonte: CBDB, 1999). | 15 |
| Tabela 2.3 — Alguns resultados da mortalidade de peixes que passam por turbinas (Fonte: CBDB, 1999). | 45 |
| Tabela 2.4 – Equações dimensionais das variáveis consideradas na equação geral da hidráulica. | 47 |
| Tabela 2.5 –Alguns grupos adimensionais e variáveis utilizadas na mecânica dos fluidos (Munson <i>et al.</i> 2004). | 48 |
| Tabela 2.6 – Resumo das características dos modelos utilizados por Rajaratnam <i>et al.</i> (1986) e Rajaratnam <i>et al.</i> (1992). | 52 |
| Tabela 2.7 – Coeficientes da Eq. (2.31) obtidos no trabalho de Rajaratnam <i>et al</i> (1986) e (1992). | 57 |
| Tabela 2.8 – Potência dissipada por unidade de volume (W/m^3) para os modelos e correspondentes protótipos ($b_0 = 0,305$ m). Fonte: Puertas <i>et al.</i> (2004). | 63 |
| Tabela 2.9– Resumo de velocidades características de peixes presentes em rios brasileiros. . | 76 |
| Tabela 3.1– Resumo das características físicas dos modelos experimentais e do protótipo.... | 84 |
| Tabela 3.2 – Resumo das condições do escoamento nas medições realizadas na Estrutura A. | 84 |
| Tabela 3.3 – Resumo das condições do escoamento nas medições realizadas na Estrutura B (Figura 3.16a). | 96 |
| Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios realizados..... | 102 |
| Tabela 4.2 – Velocidades máximas na seção da ranhura (valores de modelo). | 134 |
| Tabela 4.3 – Máximas velocidades médias na seção da ranhura..... | 135 |
| Tabela 4.4 – Velocidade crítica de algumas espécies de peixes presentes na ictiofauna brasileira. | 162 |
| Tabela 4.5 – Valores característicos das velocidades na escada para peixes com orifícios de fundo. | 208 |
| Tabela A2.1: Energia cinética da turbulência considerando diferentes filtros (cm^2/s^2). | 274 |
| Tabela A2.2: Tensões de Reynolds no plano xy considerando diferentes filtros (N/m^2). | 275 |
| Tabela A2.3: Percentual de dados restantes na série após aplicados os diferentes filtros (%). | 276 |
| Tabela A2.4: Resumo das características e parâmetros utilizados nos ensaios para os velocímetros Doppler: Nortek e Sontek. | 278 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Vista parcial da primeira escada para peixes construída no Brasil (1911), na Barragem de Itaipava, no Rio Pardo em Santa Rosa de Viterbo, SP. Fonte: Godoy (1985)..... | 8 |
| Figura 2.2 – Escada para peixes da barragem Manoel Alves, com orifícios de fundo e descarregadores de superfície (a) fase construtiva; (b) em funcionamento em 2006. Fonte: Cortesia da Magna Engenharia Ltda. | 12 |
| Figura 2.3 – Vista de montante para jusante da escada para peixes da UHE Peixe Angical (TO). | 13 |
| Figura 2.4 – Vista da escada para peixes construída no Rio Connecticut, nas Turner Falls, com curva e dobra para torná-la mais compacta. Foto: Larinier (2001). | 15 |
| Figura 2.5 – Geometrias de defletores de escadas para peixes com combinações de descarregadores e orifícios. Fonte: Adaptado de Odeh (1999a)..... | 16 |
| Figura 2.6 – Tipos de escoamento em escadas para peixes do tipo soleira vertedoura: (a) escoamento do tipo “ <i>plunging</i> ”; (b) escoamento do tipo “ <i>streaming</i> ” Fonte: Adaptado de Clay (1995). | 17 |
| Figura 2.7 – Regimes de escoamento em escadas para peixes do tipo piscinas/vertedouros segundo Ead <i>et al.</i> (2004). Adaptado de Ead <i>et al.</i> (2004)..... | 18 |
| Figura 2.8 – Simplificações do escoamento em escadas para peixes do tipo soleira vertedoura: (a) escoamento do tipo “ <i>plunging</i> ”; (b) escoamento do tipo “ <i>streaming</i> ”. Fonte: Adaptado de Rajaratnam <i>et al.</i> (1988)..... | 19 |
| Figura 2.9 – Tipos de escoamentos em escadas para peixes com descarregador: (a) livre ou não-afogado; (b) semi-afogado. Fonte: Adaptado de Larinier (1992)..... | 20 |
| Figura 2.10 – Configuração geral de uma escada para peixes do tipo ranhura vertical simples e ranhura vertical dupla. Fonte: Adaptado de Odeh (1999a). | 23 |
| Figura 2.11 – Exemplos de escadas para peixes com ranhuras verticais: (a) UHE Igarapava (Fonte: www.uhe-igarapava.com.br); (b) em construção na Austrália (Fonte: Pena, 2004).... | 23 |
| Figura 2.12 – Representação do escoamento uniforme em uma escada para peixes. Fonte: Adaptado de Kamula (2001). | 24 |
| Figura 2.13 - Esquema dos esforços envolvidos no escoamento “uniforme” em escadas para peixes. | 24 |
| Figura 2.14 – Definição das variáveis utilizadas para calcular o coeficiente de descarga, segundo Rajaratnam <i>et al.</i> (1986). Fonte: Adaptado de Larinier (2002c)..... | 26 |
| Figura 2.15 – Esquema de uma passagem tipo Denil. Fonte: Adaptado de Kamula (2001).... | 27 |
| Figura 2.16 – MTP do tipo rio artificial no rio Siikajoki na Finlândia. Fonte: Larinier (2001) Foto: Marmulla. | 28 |
| Figura 2.17 – Canal de piracema da Itaipu Binacional. Fonte: www.itaipu.gov.br | 28 |
| Figura 2.18 – Princípio de operação de uma eclusa para peixes. Fonte: CBDB (1999). | 30 |
| Figura 2.19 – Esquema da eclusa para peixes (construída na UHE St. Stephen, EUA). Fonte: Adaptado de http://www.dnr.sc.gov/news/Yr2006/feb20/feb20_lift.html | 30 |
| Figura 2.20 – Esquema do elevador de peixes. Fonte: Adaptado de Safe Harbor Water Power Comporation (http://www.shwpc.com/fishlift.html , acesso 08/03/2007). | 31 |
| Figura 2.21 – Elevador da UHE Sérgio Motta (Porto Primavera). Fonte: Martins (2005). | 32 |
| Figura 2.22 – Esquema do funcionamento do elevador para peixes da UHE Funil. Fonte: Adaptado de www.ahefunil.com.br | 33 |
| Figura 2.22 (continuação) – Esquema do funcionamento do elevador para peixes da UHE Funil..... | 34 |
| Figura 2.23 – Mecanismo de transporte de peixes instalado no Rio Saint John, Barragem Mactaquac, no Canadá. Fonte: Larinier (2001). | 35 |
| Figura 2.24 – Esquema de transposição utilizando elevador com caminhão-tanque. Fonte: Pompeu e Martinez (2003). | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.25 – Esquema de funcionamento de um mecanismo de transposição de enguias. Fonte: Adaptado de Odeh (1999a)..... | 37 |
| Figura 2.26 – Detalhes de uma escada para enguias: (a) seção transversal; (b) cerdas para auxiliar a subida das enguias. Fonte: Clay (1995)..... | 37 |
| Figura 2.27 – Esquema de posicionamento de uma escada para peixes em relação ao vertedouro. Fonte: Adaptado de Larinier (2002b)..... | 40 |
| Figura 2.28 – Instalação de escadas para peixes em usinas hidrelétricas. Fonte: Adaptado de Larinier (2002b). | 41 |
| Figura 2.29 – Esquema de entradas múltiplas do tipo galeria situadas acima da saída das turbinas. Fonte: Adaptado de Larinier (2002b). | 41 |
| Figura 2.30 – Exemplos de modificações na entrada da escada para peixes, que tornaram as estruturas mais atrativas aos peixes. Fonte: Adaptado de Bunt (2001)..... | 42 |
| Figura 2.31 – Saída múltipla da escada para peixes da barragem Manoel Alves/TO (a) vista de jusante para montante da escada para peixe; (b) vista de montante para jusante. | 43 |
| Figura 2.32 – Danos causados a peixes que passam por turbinas: (a) olhos inchados; (b) corpos dilacerados. Fonte: Pavlov <i>et al.</i> (2002)..... | 45 |
| Figura 2.33 – Geometria da escada para peixes estudada por Wu <i>et al.</i> (1999). Fonte: Adaptado de Wu <i>et al.</i> (1999). | 52 |
| Figura 2.34 – Geometria dos modelos estudados por Rajaratnam <i>et al.</i> (1986) e respectivos padrões gerais do escoamento. Fonte: Rajaratnam <i>et al.</i> (1986) e Rajaratnam <i>et al.</i> (1992) ... | 53 |
| Figura 2.35 – Padrões do escoamento encontrados por Wu <i>et al.</i> (1999): (a) padrão 1; (b) padrão 2. Fonte: Adaptado de Wu <i>et al.</i> (1999). | 54 |
| Figura 2.36 – Geometria dos modelos estudados por Puertas <i>et al.</i> (2004) e Pena (2004). Fonte: Adaptado de Puertas <i>et al.</i> (2004). | 55 |
| Figura 2.37 – Padrões do escoamento nos tanques encontrado por Puertas <i>et al.</i> (2004) – (a) Geometria T1, $S_0 = 5,7\%$ e $S_0 = 10,054\%$ com $Q^A < 2,75$; (b) Geometria T1, $S_0 = 10,054\%$ com $Q^A > 2,75$ e (c) Geometria T2 (Q^A definida pela Eq. (2.17)). Fonte: Adaptado de Puertas <i>et al.</i> (2004). | 56 |
| Figura 2.38 – Esquema da escada para peixes do tipo ranhura vertical com interrupção na base da abertura, estudada por Pena (2004). Adaptado de Pena (2004)..... | 56 |
| Figura 2.39 – Coeficiente de descarga para as diferentes geometrias (1 a 18 da Figura 2.34) estudadas por Rajaratnam <i>et al.</i> (1986) e Rajaratnam <i>et al.</i> (1992). | 59 |
| Figura 2.40 – Linhas de nível da superfície livre do escoamento para uma vazão de $0,065 \text{ m}^3/\text{s}$, no modelo de geometria T1 e declividade do canal de $10,054\%$. Fonte: Pena (2004). | 60 |
| Figura 2.41 – Resultados obtidos por Coletti (2005) para um modelo na escala 1:20, com declividade de 6% e vazão em protótipo de $1,21 \text{ m}^3/\text{s}$. (a) campo de pressões, (b) campo dos desvios padrões. Fonte: Coletti (2005). | 62 |
| Figura 2.42 – Resultados de energia cinética da turbulência adimensionalizada (k_A) ao longo da profundidade do escoamento, para as geometrias estudadas e para as diferentes vazões, na região de maior turbulência, obtidos por Puertas <i>et al.</i> (2004) e Pena (2004)..... | 65 |
| Figura 2.43 – Coeficiente de arrasto (C_D) em função do número de Reynolds (Re) para o corpo de forma hidrodinâmica, com relação $D/L = 0,18$. Fonte: Videler (1993)..... | 72 |
| Figura 2.44 – Estimativa do trabalho exigido em função da velocidade de nado utilizada pelos peixes. Fonte: Bell (1986). | 73 |
| Figura 2.45 – Máxima capacidade natatória em função do comprimento do peixe para temperaturas da água entre 2° e 25°C . Adaptado de Beach (1984) | 74 |
| Figura 2.46 – Tempo que o peixe resiste utilizando a velocidade máxima de nado em função do comprimento do peixe para temperaturas da água entre 2° e 25°C . Adaptado de Beach (1984)..... | 74 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.1 – Modelo físico utilizado neste estudo, representativo de parte da escada da UHE de Igarapava, denominado Estrutura A: (a) esquema geral do modelo (sem a lateral esquerda); (b) esquema em planta; (c) vista geral. | 82 |
| Figura 3.2 – (a) esquema em planta de um tanque do modelo com as principais dimensões; (b) vista do mesmo no modelo (as setas indicam o sentido do escoamento médio). | 82 |
| Figura 3.3 – (a) conjunto motor-bomba; (b) inversor de frequência; (c) medidor de vazão eletromagnético. | 83 |
| Figura 3.4 – Ponta linimétrica fixada ao carrinho móvel sobre o canal. | 85 |
| Figura 3.5 – Esquema dos planos de medição da profundidade do escoamento ao longo do modelo. | 86 |
| Figura 3.6 – Instrumentos de medição de pressão: (a) transdutor de pressão - sensores piezoresistivos (escala em cm); (b) quadro de piezômetros. | 87 |
| Figura 3.7 – Esquema do sistema de aquisição de dados de pressão utilizando sensores piezoresistivos. Fonte: Coletti (2005). | 87 |
| Figura 3.8 – Localização das tomadas de medição de pressão no tanque de controle (medidas em cm). | 88 |
| Figura 3.9 – Esquema do princípio de funcionamento do ADV. Adaptado de Sontek (2001). | 89 |
| Figura 3.10 – (a) pontos de medição de velocidade em um dos planos paralelos ao fundo; (b) detalhe dos pontos de medição de velocidade na ranhura (medidas em cm). | 92 |
| Figura 3.11 – Carrinho móvel sobre o canal para fixação do ADV nos pontos de medição. | 92 |
| Figura 3.12 – Estrutura B: (a) vista geral da estrutura; (b) detalhe do septo com a possibilidade de abertura regulável de descarregador de superfície e orifício de fundo; (c) esquema geral da estrutura (medidas em cm). | 93 |
| Figura 3.13 – Esquema da configuração geométrica dos tanques: (a) estrutura B1 - com descarregador de superfície; (b) estrutura B2 - com orifício de fundo. | 95 |
| Figura 3.14 – (a) controlador da vazão que entra no sistema; (b) registro manual de controle da vazão que sai do sistema. | 96 |
| Figura 3.15 – Régua graduada na lateral da região do descarregador de superfície. | 97 |
| Figura 3.16 – Esquema dos pontos de medição de velocidades nos modelos das passagens para peixes por descarregador de superfície e orifício de fundo: (a) representação dos planos de medição de velocidades paralelos ao fundo (h_m é a profundidade média no tanque); (b) malha de medição de velocidade em cada um dos planos (dimensões em cm). | 99 |
| Figura 3.17 – Detalhe das medições realizadas na região do descarregador: (a) vista da região; (b) malha de medição de velocidades (dimensões em cm). | 99 |
| Figura 3.18 – Carrinho móvel sobre o canal onde é preso o ADV. | 100 |
| Figura 4.1 – Coeficientes de descarga obtidos neste estudo comparados com o valor medido em protótipo (Viana, 2005) e os dados de Rajaratnam <i>et al.</i> (1986) e Coletti (2005), onde h_m é a profundidade média no tanque (na legenda desenhos da Figura 2.34 e declividade das estruturas em percentual). | 104 |
| Figura 4.2 – Vazão adimensional comparada com resultados da literatura. | 105 |
| Figura 4.3 – Coeficiente de cisalhamento comparado com dados de outros pesquisadores. | 106 |
| Figura 4.4 – Linhas de nível da superfície livre do escoamento no tanque de controle para: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$ e (b) $Q= 0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, do presente estudo. | 107 |
| Figura 4.5 – Campo de pressões médias obtido com: (a) transdutores; (b) piezômetros, em mm.c.a, para a vazão de $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$ em modelo 1:5 (presente estudo). | 109 |
| Figura 4.6 – Campo de pressões médias obtido por Coletti (2005) para a vazão correspondente a $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo 1:5. | 109 |
| Figura 4.7 – Variação dos momentos estatísticos de pressão: (a) desvio padrão; (b) coeficiente de assimetria; (c) coeficiente de curtose, ao longo do tanque de controle para a vazão de $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$ em modelo na escala 1:5. | 110 |
| Figura 4.8 – Campo de velocidades médias para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 114 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.9 – Campo de velocidades médias para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)... | 114 |
| Figura 4.10 – Campo de velocidades médias para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)... | 115 |
| Figura 4.11 – Velocidades no plano paralelo ao fundo, em diferentes profundidades, na linha do jato principal: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$. | 116 |
| Figura 4.12 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=3 \text{ cm}$). | 120 |
| Figura 4.13 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=14,3 \text{ cm}$). | 121 |
| Figura 4.14 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=22,1 \text{ cm}$). | 122 |
| Figura 4.15 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=41,7 \text{ cm}$). | 123 |
| Figura 4.16 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=56,0 \text{ cm}$). | 124 |
| Figura 4.17 – Campo de velocidades em um plano vertical transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=5,4 \text{ cm}$). | 125 |
| Figura 4.18 – Campo de velocidades em um plano vertical transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=25,5 \text{ cm}$). | 126 |
| Figura 4.19 – Campo de velocidades em um plano vertical transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=49,3 \text{ cm}$). | 127 |
| Figura 4.20 – Representação tridimensional dos vetores de velocidade média para: (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$. | 129 |
| Figura 4.21 – Componentes de velocidades horizontais perpendiculares a ranhura (V_{xy^*}) para: (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$. | 130 |
| Figura 4.22 – Perfis de velocidades resultantes horizontais na ranhura (V_{xy^*}) para: (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$. | 131 |
| Figura 4.23 – Componentes de velocidades resultantes horizontais na ranhura (V_{xy}) para: (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$. | 131 |
| Figura 4.24 – Perfis de velocidades resultantes horizontais na ranhura (V_{xy}) para: (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$. | 132 |
| Figura 4.25 – Componentes de velocidades verticais (V_z) na seção da ranhura para: (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$. | 133 |
| Figura 4.26 – Máximas velocidades médias na seção da ranhura. | 135 |
| Figura 4.27 – Campo de energia cinética média para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)... | 138 |
| Figura 4.28 – Campo de energia cinética média para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)... | 138 |
| Figura 4.29 – Campo de energia cinética média para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)... | 139 |
| Figura 4.30 – Valores médios de energia cinética média para cada plano paralelo ao fundo. | 140 |
| Figura 4.31 – Campo de energia cinética média na seção da ranhura para (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$. | 141 |
| Figura 4.32 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 143 |
| Figura 4.33 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 143 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.34 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 144 |
| Figura 4.35 – Valores médios de energia cinética da turbulência para cada plano paralelo ao fundo. | 145 |
| Figura 4.36 – Campo de energia cinética da turbulência na seção da ranhura para: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ | 146 |
| Figura 4.37 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 147 |
| Figura 4.38 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 147 |
| Figura 4.39 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 148 |
| Figura 4.40 – Valores médios de intensidade da turbulência para cada plano paralelo ao fundo. | 149 |
| Figura 4.41 – Campo de intensidades da turbulência na seção da ranhura para: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ | 150 |
| Figura 4.42 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)..... | 151 |
| Figura 4.43 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)..... | 151 |
| Figura 4.44 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 152 |
| Figura 4.45 – Valores médios das tensões de Reynolds no plano xy para cada plano paralelo ao fundo. | 153 |
| Figura 4.46 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy na seção da ranhura para: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ | 154 |
| Figura 4.47 – <i>Astyanax bimaculatus</i> (lambari) entrando na região de maior velocidade do escoamento. Fonte: Vicentini <i>et al.</i> (2004) e Viana (2005). As setas indicam as principais correntes do escoamento. | 157 |
| Figura 4.48 – <i>Astyanax bimaculatus</i> (lambari) executando a passagem pela ranhura vertical. Fonte: Vicentini <i>et al.</i> (2004) e Viana (2005). As setas indicam as principais correntes do escoamento. | 157 |
| Figura 4.49 – <i>Astyanax bimaculatus</i> (lambari) próximo a parede, região preferencial para descanso. Fonte: Vicentini <i>et al.</i> (2004) e Viana (2005). As setas indicam as principais correntes do escoamento. | 158 |
| Figura 4.50 – <i>Astyanax bimaculatus</i> (lambari) próximo a parede, região preferencial para descanso. Fonte: Vicentini <i>et al.</i> (2004) e Viana (2005). As setas indicam as principais correntes do escoamento. | 158 |
| Figura 4.51 – Posicionamento do peixe a jusante da primeira ranhura no caminho de jusante-montante, no modelo na escala 1:20. Fonte: Própria. | 159 |
| Figura 4.52 – Passagem do peixe pelo primeiro tanque no modelo na escala 1:20, entre a 1º e a 2º ranhura. Tempo em segundos. Fonte: Própria. | 160 |
| Figura 4.53 – Passagem do peixe pelo primeiro tanque no modelo na escala 1:20, entre a 2º e a 3º ranhura. Tempo em segundos. Fonte: Própria. | 161 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.54 – Delimitação das regiões com velocidades superiores à velocidade crítica das espécies mandi (1,47 m/s), piau (1,32 m/s) e curimba (1,23 m/s) para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)..... | 164 |
| Figura 4.55 – Delimitação das regiões com velocidades superiores à velocidade crítica das espécies mandi (1,47 m/s), piau (1,32 m/s) e curimba (1,23 m/s) para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)..... | 164 |
| Figura 4.56 – Delimitação das regiões com velocidades superiores à velocidade crítica das espécies mandi (1,47 m/s), piau (1,32 m/s) e curimba (1,23 m/s) para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)..... | 165 |
| Figura 4.57 – Classificação da velocidade na ranhura na escala de protótipo, de acordo com a velocidade crítica das espécies mandi (1,47 m/s), piau (1,32 m/s) e curimba (1,23 m/s) para: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ | 166 |
| Figura 4.58 – Perfil do escoamento na região do descarregador para diferentes vazões (O descarregador está na distância = 0)..... | 168 |
| Figura 4.59 – Coeficiente de descarga do descarregador de superfície para diferentes vazões. | 169 |
| Figura 4.60 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)..... | 173 |
| Figura 4.61 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)..... | 173 |
| Figura 4.62 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)..... | 174 |
| Figura 4.63 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,16 \text{ x/L}$)..... | 175 |
| Figura 4.64 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,58 \text{ x/L}$)..... | 176 |
| Figura 4.65 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,90 \text{ x/L}$) para as vazões: (a) $0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$ | 177 |
| Figura 4.66 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,10 \text{ y/B}$)..... | 178 |
| Figura 4.67 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,25 \text{ y/B}$)..... | 179 |
| Figura 4.68 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,50 \text{ y/B}$)..... | 180 |
| Figura 4.69 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,75 \text{ y/B}$)..... | 181 |
| Figura 4.70 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,90 \text{ y/B}$)..... | 182 |
| Figura 4.71 – Esquema do escoamento na escada para peixes com descarregador de superfície: (a) $0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$ | 184 |
| Figura 4.72 – Campo de energia cinética média para $Q=0,036,8 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)..... | 186 |
| Figura 4.73 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal)..... | 186 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.74 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 187 |
| Figura 4.75 – Valores médios de energia cinética média para cada plano paralelo ao fundo no modelo de descarregador de superfície. | 188 |
| Figura 4.76 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 190 |
| Figura 4.77 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 190 |
| Figura 4.78 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 191 |
| Figura 4.79 – Imagens da trajetória dos peixes (destaque em vermelho) no deslocamento para montante: (a) região de aproximação abaixo do descarregador, entre a parede e o jato mergulhante e (b) peixes passando pelo descarregador. Fotos: Ceditas por Ana M. Silva e Antônio Pinheiro. | 192 |
| Figura 4.80 – Valores médios da energia cinética da turbulência para cada plano paralelo ao fundo do modelo de descarregador de superfície. | 192 |
| Figura 4.81 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 194 |
| Figura 4.82 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 194 |
| Figura 4.83 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 195 |
| Figura 4.84 – Valores médios de intensidade da turbulência para cada plano paralelo ao fundo no modelo de descarregador de superfície. | 196 |
| Figura 4.85 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 198 |
| Figura 4.86 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 198 |
| Figura 4.87 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 199 |
| Figura 4.88 – Valores médios das tensões de Reynolds (N/m^2) no plano xy para cada plano paralelo ao fundo no modelo de descarregador de superfície. | 200 |
| Figura 4.89 – Coeficientes de descarga da escada para peixes com orifícios de fundo para diferentes vazões. | 201 |
| Figura 4.90 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 204 |
| Figura 4.91 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 204 |
| Figura 4.92 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 205 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.93 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,16 x/L$). | 209 |
| Figura 4.94 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,58 x/L$). | 210 |
| Figura 4.95 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,90 x/L$). | 211 |
| Figura 4.96 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,10 y/B$). | 212 |
| Figura 4.97 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,25 y/B$). | 213 |
| Figura 4.98 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,50 y/B$). | 214 |
| Figura 4.99 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,75 y/B$). | 215 |
| Figura 4.100 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,90 y/B$) para as vazões: (a) $0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$ | 216 |
| Figura 4.101 – Máximas velocidades médias medidas no tanque da passagem para peixes com orifício de fundo. | 217 |
| Figura 4.102 – Esquema do escoamento na escada para peixes com orifício de fundo: (a) $0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$ | 218 |
| Figura 4.103 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 220 |
| Figura 4.104 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 220 |
| Figura 4.105 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 221 |
| Figura 4.106 – Valores médios de energia cinética média para cada plano paralelo ao fundo no modelo com orifício de fundo. | 222 |
| Figura 4.107 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 224 |
| Figura 4.108 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 224 |
| Figura 4.109 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 225 |
| Figura 4.110 – Valores médios da energia cinética da turbulência para cada plano paralelo ao fundo no modelo da escada para peixes com orifícios de fundo. | 226 |
| Figura 4.111 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 227 |
| Figura 4.112 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 227 |
| Figura 4.113 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 228 |
| Figura 4.114 – Valores médios de intensidade da turbulência para cada plano paralelo ao fundo no modelo com orifício de fundo. | 229 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.115 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 231 |
| Figura 4.116 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 231 |
| Figura 4.117 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). | 232 |
| Figura 4.118 – Valores médios das tensões de Reynolds (N/m^2) no plano xy para cada plano paralelo ao fundo no modelo com orifício de fundo. | 233 |
| Figura A1.1 – Vista aérea da escada para peixes da UHE Igarapava. | 258 |
| Figura A1.2 – Vista de um trecho da escada para peixes da UHE Igarapava. | 258 |
| Figura A2.1 – (a) velocidade do som versus temperatura; (b) velocidade do som versus salinidade. | 260 |
| Figura A2.2 – (a) série de dados com “spikes”; (b) série de dados “limpa”; (c) PSTM aplicado a série (a); PSTM aplicado a série (b). | 263 |
| Figura A2.3 – Avaliação dos momentos estatísticos: (a) média; (b) desvio padrão; (c) coeficiente de assimetria; (d) coeficiente de curtose; no ponto P1, para diferentes frequências, faixas de velocidade e tempos de aquisição. | 266 |
| Figura A2.4 – Posição de medição selecionada para a avaliação dos filtros com presença de bolhas de ar. | 267 |
| Figura A2.5 – Pontos selecionados para a avaliação dos filtros. | 269 |
| Figura A2.6 – Influência do tipo de filtro utilizado na avaliação da energia cinética da turbulência para três pontos: (a) 3C; (b) G11 e (c) G15, de acordo com a representação ao lado de cada gráfico. | 271 |
| Figura A2.7 – Influência do tipo de filtro utilizado na avaliação da tensão de Reynolds no plano xy para três pontos: (a) 3C; (b) G11 e (c) G15, de acordo com a representação ao lado de cada gráfico. | 272 |
| Figura A2.8 – Percentual de dados restantes após a aplicação dos diferentes processos de filtro para os três pontos: (a) 3C; (b) G11 e (c) G15, de acordo com a representação ao lado de cada gráfico. | 273 |
| Figura A2.9 – Série de dados (a) ponto 3C, distante 10% h_m do fundo, sem aplicação do filtro; (b) ponto 3C, distante 10% h_m do fundo com filtro PSTM; (c) ponto 3C, distante 80% h_m do fundo, sem aplicação do filtro; (d) ponto 3C, distante 80% h_m do fundo com filtro PSTM. | 277 |
| Figura A3.1 – Localização dos pontos onde foram realizados testes para avaliar a influência do comprimento da conexão transdutor-tomada. | 279 |
| Figura A3.2 – Pressão média para os diferentes comprimentos de mangueiras utilizadas. | 279 |
| Figura A3.3 – Variação da amplitude dos valores de pressão com o comprimento da mangueira. | 280 |
| Figura A3.4 – Espectros de potência obtidos no ponto H10, comparando diferentes comprimentos de condutos de ligação entre a tomada de pressão e o transdutor. | 281 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------|--|
| A | Distância percorrida pelo peixe |
| b | Largura de uma escada para peixes do tipo soleira vertedoura |
| b_0 | Largura da ranhura de um MTP do tipo ranhura vertical |
| B | Largura do tanque de uma escada para peixes |
| C | Coefficiente de isotropia |
| Ca | Número de Cauchy |
| C_d | Coefficiente de descarga |
| C_D | Coefficiente de arrasto |
| C_f | Coefficiente de cisalhamento |
| d | Profundidade do escoamento de acordo com a figura 2.4 |
| D | Distância |
| E | Módulo de elasticidade |
| Eu | Número de Euler |
| f | Frequência de ondulação do corpo e da nadadeira caudal dos peixes |
| F_D | Força de arrasto |
| Fr | Número de Froude |
| g | Aceleração da gravidade |
| h | Profundidade do escoamento |
| h_m | Profundidade média do escoamento no centro do tanque de uma escada para peixes |
| k | Energia cinética da turbulência |
| k_A | Energia cinética da turbulência adimensionalizada |
| K | Energia cinética média |
| l | Comprimento de um peixe |
| l_p e l_m | Comprimento em protótipo e em modelo |
| L | Comprimento do tanque de uma escada para peixes |
| m | Coefficiente utilizado em MTP do tipo ranhura vertical, que depende da geometria da ranhura ($m = 1$, quando o jato principal tem de um lado parede e de outro fluido, e $m = 2$, quando há fluido contornando o jato principal dos dois lados) |
| Ma | Número de Mach |
| p | Pressão |
| p_p e p_m | Pressão em modelo e em protótipo, respectivamente |

| | |
|--------------------------|--|
| P | Peso de um volume de controle (figura 2.8) |
| q_p e q_m | Vazão específica em protótipo e em modelo, respectivamente |
| Q | Vazão |
| Q^* | Vazão adimensional |
| Q^{**} | Vazão adimensional proposta por Kamula (2001) |
| Q^A | Vazão adimensional proposta por Puertas <i>et al.</i> (2004) |
| Q_+ | Vazão adimensional em uma escada para peixes do tipo soleira vertedoura com escoamento do tipo “ <i>plunging</i> ” |
| Q_p e Q_m | Vazão em protótipo e em modelo, respectivamente |
| Q_t | Vazão de transição entre os regimes “ <i>plunging</i> ” e “ <i>streaming</i> ” |
| \hat{Q}_t | Valor adimensional da vazão de transição entre os regimes “ <i>plunging</i> ” e “ <i>streaming</i> ” |
| Re | Número de Reynolds |
| S ou S_0 | Declividade do canal da escada para peixes |
| St | Número de Strouhal |
| t | Tempo |
| U | Velocidade de deslocamento do peixe (Velocidade de nado – velocidade do escoamento) |
| v_i' | Componente turbulenta da velocidade |
| v_x' , v_y' e v_z' | Componentes tridimensionais da velocidade |
| V | Velocidade |
| V_{cr} | Velocidade crítica de natação de peixes |
| V_i | Componente de velocidade média |
| V_{peixe} | Velocidade de nado do peixe |
| V_p , V_m | Velocidade em protótipo e em modelo, respectivamente |
| V_{max} | Velocidade máxima suportada pelo peixe ou velocidade de explosão |
| V_{mr} | Velocidade média na ranhura |
| $V_{ótima}$ | Velocidade ótima de nado |
| V_{xy} | Velocidade média no plano horizontal |
| We | Número de Weber |
| \bar{y} | Profundidade do escoamento a montante da ranhura |
| y_b | Profundidade média na ranhura de uma escada tipo ranhura vertical |
| z | Altura de obstáculo na ranhura vertical, definida na figura 2.22 |

| | |
|------------------------------|---|
| ε | Potência dissipada por unidade de volume (tratado por alguns autores como taxa de dissipação de energia) |
| γ | Peso específico |
| Δh | Perda de energia entre dois tanques consecutivos, dada pela diferença de nível entre estes tanques sucessivos de uma escada para peixes |
| Δx | Comprimento elementar definido na figura 2.8 |
| λ | Relação entre a dimensão do protótipo e a dimensão do modelo |
| μ | Viscosidade dinâmica |
| $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$ | Números adimensionais, obtidos com o teorema de Buckingham |
| ρ | Massa específica da água |
| σ | Tensão superficial |
| $\bar{\tau}$ | Tensão de cisalhamento entre o escoamento superficial deslizante e a recirculação do tanque, no escoamento do tipo “ <i>streaming</i> ” de um MTP tipo vertedouro |
| $\bar{\tau}_0$ | Tensão de cisalhamento em MTP do tipo ranhura vertical |

CAPÍTULO 1

1. Introdução

1.1. Motivação do Trabalho

A construção de barramentos ao longo dos rios causa muitas alterações no meio envolvido. Entre estes impactos, tem-se a formação de uma barreira que impede o deslocamento de jusante para montante de espécies aquáticas. Este efeito pode resultar no desaparecimento de muitas espécies da ictiofauna que dependem da migração para que ocorra a reprodução.

Cada parte de um rio constitui o habitat de uma determinada espécie de peixe, que aí se estabeleceu devido às características do local: velocidade da corrente, profundidade da água, natureza do leito e das margens, possibilidade de movimentação, regime do rio e qualidade da água. Qualquer mudança nessas características provoca uma alteração ou redistribuição da população de peixes (CBDB, 1999).

Por estes motivos, durante a fase de planejamento de um novo barramento deve-se estudar a ictiofauna local, buscando conhecer as suas características reprodutivas, alimentares, natatórias e migratórias, para que sejam tomadas medidas no sentido da conservação da vida aquática.

As medidas para atenuação do impacto no meio aquático incluem a implantação ou planejamento de mecanismos de transposição de peixes (MTP) para a operação durante toda a vida útil do barramento. Faz-se necessária a verificação de condições adequadas de desova a montante, a possibilidade da descida dos peixes jovens e retorno dos peixes adultos, entre outros.

Os mecanismos de transposição de peixes são estruturas ou sistemas que possibilitam a migração da ictiofauna entre as partes de jusante e montante de uma barragem, sendo muito importantes, principalmente, por permitir a reprodução dos peixes de piracema que se deslocam em direção às cabeceiras dos rios nesse processo. Os MTP, de uma forma geral, podem ser escadas para peixes, eclusas, elevadores ou sistemas de captura, transporte e soltura.

De acordo com Martins e Tamada (2000) existem no mundo 45.000 barragens e 13.000 MTP, ou seja, quase 30% desses empreendimentos possuem algum tipo de mecanismo

de transposição de peixes. No entanto, analisando a situação do Brasil, contabiliza-se cerca de 60 MTP do tipo escada para peixes, o que representa aproximadamente 1,4% do número oficial de barragens brasileiras. Além de ser uma parcela bastante pequena dos MTP instalados, muitos não funcionam ou operam precariamente, não solucionando o problema dos peixes migratórios brasileiros.

Na verdade, esse cenário de MTP que não resolvem de forma satisfatória a transposição dos obstáculos pelas espécies não ocorre somente no Brasil, mas em muitas situações onde as espécies de peixes são não-salmonídeos. Muitos dos MTP apresentam projetos inadequados, com base em critérios internacionais que não consideram parâmetros biológicos locais, por falta de informações da ictiofauna. Outro problema muito comum caracteriza-se por deficiências na operação e/ou manutenção dos mecanismos.

Verifica-se um universo complexo englobando os MTP, com um cenário de caráter multidisciplinar incluindo condicionantes hidráulicos, biológicos, técnicos e econômicos. Na literatura encontram-se vários estudos sobre escadas para peixes, em modelos físicos e em protótipos, e algumas pesquisas sobre o comportamento da ictiofauna. Os próximos estudos devem seguir o caminho de relacionar os aspectos hidráulicos aos fatores biológicos. A partir do momento em que houver associações entre determinada espécie ou grupo a certa faixa de condições hidráulicas, os novos projetos terão maiores chances de sucesso.

O comportamento hidráulico do escoamento em escadas para peixes, embora a bibliografia apresente vários estudos, como será demonstrado no capítulo de revisão bibliográfica, não é conhecido em sua totalidade. A maioria dos trabalhos apresenta os padrões gerais do escoamento baseados em análises visuais e em valores médios de velocidade. Outro parâmetro geralmente utilizado na caracterização destas estruturas é a potência dissipada por unidade de volume, que é função das condições de contorno do escoamento. Raramente esses dados estão associados a características biológicas e dificilmente têm-se estudos de parâmetros turbulentos e de aeração, que podem influenciar significativamente o comportamento do peixe na estrutura.

Tem-se na literatura a associação de determinadas faixas de potência dissipada por unidade de volume com certos tipos de peixes. Bell (1973) *apud* Bell (1990) propôs, pela primeira vez, a associação de um critério para definir o máximo escoamento em uma passagem para peixes. Bell sugeriu que a máxima dissipação de energia dentro do tanque deveria ser de $0,191 \text{ kW/m}^3$. Muitos autores utilizam esse parâmetro como indicador da turbulência do escoamento, inclusive associando determinadas faixas de potência dissipada por unidade de volume a certos tipos de peixes. No entanto, observa-se que muitas estruturas com valores semelhantes de potência dissipada por unidade de volume apresentam padrões de

escoamento totalmente diferentes e nem sempre atrativos para os peixes, apontando-se então, que a observação desse parâmetro e das velocidades máximas pode ser insuficiente.

Neste contexto encontra-se a necessidade de novos estudos em modelos de MTP, através da caracterização hidráulica, avaliando além das componentes médias do escoamento, os parâmetros turbulentos e de alguma maneira relacionando esses fatores com as preferências biológicas. Sabe-se que essa tarefa é bastante audaciosa e certamente não será neste trabalho que serão resolvidos todos os itens necessários ao dimensionamento de um MTP eficiente, mas busca-se contribuir para a compreensão do seu funcionamento.

1.2. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as características macroturbulentas do escoamento em três geometrias de escadas para peixes por bacias sucessivas, através de medições em modelos físicos, buscando a definição de parâmetros hidráulicos que possam ser associados à aceitação/rejeição dos peixes.

1.3. Objetivos Específicos

Para o atendimento do objetivo principal deste trabalho, delimitam-se alguns objetivos específicos:

- conhecer os campos médios de velocidade nos tanques de cada geometria estudada;
- conhecer os campos de alguns parâmetros turbulentos nos tanques de cada geometria;
- definir os padrões gerais do escoamento para cada geometria;
- avaliar alguns parâmetros hidráulicos adimensionais, tais como: coeficientes de descarga, coeficiente de cisalhamento e vazão adimensional para diferentes condições de funcionamento;
- mapear os campos de pressão junto ao fundo e níveis do escoamento no tanque de controle do modelo da escada para peixes do tipo ranhura vertical;
- comparar os resultados obtidos no modelo da escada para peixes de ranhura vertical com os dados de protótipo (Viana, 2005) e de outras pesquisas em modelos reduzidos (Viana, 2005 e Coletti, 2005);
- avaliar a possibilidade de utilização das três geometrias por algumas espécies de peixes;
- comparar o comportamento hidráulico das três configurações de escadas para peixes com o objetivo de buscar as melhores condições para a transposição de peixes (com base no comportamento de determinadas espécies de acordo com a literatura).

1.4. Definição das Estruturas Estudadas

A primeira geometria escolhida para estudo é uma escada para peixes do tipo ranhura vertical similar ao MTP construído na UHE de Igarapava. Essa estrutura foi selecionada pelo fato de existir no protótipo o monitoramento das espécies de peixes que vem utilizando o mecanismo, que tem demonstrado ser pouco seletivo. Os estudos realizados nesta pesquisa vêm complementar os trabalhos anteriores (Viana, 2005; Coletti, 2005), através da avaliação de parâmetros turbulentos do escoamento, que até então não tinham sido abordados.

O monitoramento da escada para peixe da UHE de Igarapava vem sendo realizado desde que entrou em operação em 1999. Segundo Vono (2001), essa estrutura tem sido utilizada por várias espécies de peixes, de diferentes características e tamanhos. Esse fato torna essa estrutura interessante no sentido de que as características hidráulicas favorecem capacidades natatórias de diferentes espécies.

As outras duas geometrias avaliadas neste estudo são do tipo bacias sucessivas com (1) descarregadores de superfície e (2) orifícios de fundo. Essas duas configurações representam tipos de MTP muito comuns entre os existentes no Brasil e também em Portugal, (onde foram realizados os ensaios com essas geometrias), e por isso se procura a caracterização hidráulica dessas estruturas.

1.5. Organização do Trabalho

Esta tese está organizada em 6 capítulos.

No presente Capítulo é exposto o problema e os objetivos da tese aqui apresentada.

A seguir, no Capítulo 2, procura-se, com a revisão bibliográfica, fornecer ao leitor um panorama geral de cada tipo de MTP, enfatizando os tipos de escadas para peixes que são estudados nesta tese. Dentro desse capítulo considera-se importante descrever brevemente o conhecimento científico relacionado à transposição de peixes nas diferentes áreas envolvidas, enfatizando a parte hidráulica, que é o foco principal desta tese.

No Capítulo 3 são descritas as estruturas utilizadas na parte experimental e a metodologia utilizada na realização nos ensaios, de forma que fiquem claras as condições de realização dos mesmos.

Os resultados e a discussão dos ensaios são apresentados no Capítulo 4, em separado para cada uma das estruturas, a fim de tornar o texto mais claro.

O Capítulo 5 conclui o trabalho, retomando os pontos principais do produto obtido no Capítulo 4, comparando os resultados obtidos nas três geometrias.

No fim apontam-se algumas questões que devem ser abordadas na continuação do estudo neste tema.

Nos Anexos apresentam-se alguns itens que são importantes para o entendimento do trabalho, mas que, se inseridos no texto, desviariam o mesmo do objetivo principal. O Anexo 1 caracteriza a escada para peixes da UHE de Igarapava, cuja estrutura é estudada em um dos modelos. No Anexo 2 é apresentada uma análise que foi realizada nas medições obtidas com o ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) a fim de definir qual o melhor tipo de filtro a ser utilizado e as limitações envolvidas no processo de medição. No Anexo 3 apresenta-se uma análise realizada para definir como seriam conduzidos os ensaios com os sensores de pressão. Como a presente tese envolveu uma grande quantidade de trabalho experimental, para evitar que o texto torne-se cansativo e ao mesmo tempo não deixar de apresentar informações importantes, alguns dos resultados gráficos estão nos anexos 4 e 5.

CAPÍTULO 2

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Segundo Chiu *et al.* (2002) as principais causas da diminuição da população de peixes devem-se a três fatores: pesca excessiva, poluição e bloqueio dos rios, sendo que a fragmentação dos rios representa a causa mais insidiosa. Os dois primeiros problemas são de reconhecimento geral pela maior parte da população e da comunidade científica. Por outro lado, a fragmentação dos rios, pelo bloqueio imposto pela construção de barramentos muitas vezes passa despercebido pela sociedade, pelas facilidades advindas da construção dessas obras, como abastecimento de água, geração de energia, recreação, entre outros. Outro fator relevante é que a poluição e a pesca predatória afetam indivíduos isolados dentro da comunidade aquática, enquanto que o bloqueio dos rios interfere no habitat dos peixes, principalmente nos migratórios, podendo representar danos permanentes a determinadas espécies.

Sabe-se da dificuldade ou mesmo impossibilidade da supressão da maioria dos barramentos existentes e futuros. Cabe à humanidade a boa administração desses empreendimentos, de forma que sejam avaliadas as possibilidades de melhor integração entre o ambiente natural e o ambiente construído. Dentro desse contexto, existem os mecanismos de transposição de peixes, que buscam alternativas para manter a conectividade longitudinal dos rios, e com isso, assegurar o deslocamento das espécies aquáticas, principalmente as que realizam o processo de piracema.

A seguir, nesta breve revisão bibliográfica, procura-se sintetizar as informações da literatura relacionadas aos MTP, através de alguns itens como a evolução histórica, tipos de estruturas, particularidades, aspectos biológicos, entre outros. Salienta-se que após a compilação do material bibliográfico, optou-se pela apresentação dos itens e dados preponderantes, considerando a grande quantidade de informação disponível sobre o assunto. Esse fato, de certo modo, é impressionante, pois se observa que nos últimos 20 anos produziu-se muito nesta linha de pesquisa em várias partes do mundo, mas ao mesmo tempo o estado-da-arte ainda deixa muitas lacunas.

2.2 Revisão Histórica dos Mecanismos de Transposição de Peixes

2.2.1 No Mundo

Possivelmente a observação do meio construído e a verificação de que ocorriam modificações na população de peixes de determinados locais fez surgir a preocupação com a busca por alternativas para minimizar o impacto causado pela implantação de barragens.

Tem-se conhecimento da construção da primeira escada para peixes, no século XVII, na cidade de Bern (Suíça), sobre o rio Aar. Essa escada para peixes foi construída em 1640, com pouco mais de 2 m de altura (Godoy, 1985). A partir desse período observou-se que o uso de escadas para peixes foi sendo difundido para outras partes do mundo, que perceberam a necessidade da preocupação com a questão da transposição de peixes. Segundo Kamula (2001), a necessidade de dispositivos para a transposição dos peixes aumentou por volta de 1850, coincidindo com a produção de turbinas hidráulicas e a implantação de aproveitamentos hidroenergéticos em maior escala.

O trabalho realizado por Godoy (1985) apresenta um histórico do desenvolvimento das escadas para peixes em diferentes países. Aqui, são enumerados alguns dados, apenas para situar a evolução histórica mundial dos MTP:

- na Suíça, contabiliza-se que, até 1985, existiam 50 escadas para peixes em operação;
- no rio Liffey, na Irlanda, foram construídas 17 eclusas para peixes em barragens com alturas entre 3 e 42 m;
- a França começou a construção de escadas para peixes antes de 1789, segundo Gobin e Guénaux (1907) *apud* Godoy (1985);
- na Suécia até 1982 havia 15 escadas para peixes em operação;
- a Noruega é o país europeu com maior experiência em escadas e outras facilidades para subida de peixes. Em 1870 foi construída a primeira escada para peixes no país. Até 1982 existiam nesse país 340 escadas para peixes, visando a migração do salmão e das trutas;
- nos Países Baixos a experiência com passagens para peixes vem desde 1925;
- na União Soviética verificou-se que as escadas para peixes são eficientes para desníveis de até 30 m, sendo que acima deste valor recomenda-se o uso de elevadores;
- na Austrália estima-se que até 1982 existiam 55 escadas para peixes operando, construídas em barragens com até 10 m de altura;

- nos Estados Unidos, de acordo com o U. S. Fish and Wildlife Service, *apud* Godoy (1985), em 1981 existiam 100 passagens ou escadas para peixes em operação e 150 novas escadas ou passagens estavam previstas em projetos;
- nos Estados Unidos nenhuma barragem é autorizada a ser construída, em rios onde há peixes migradores, se a questão peixe e sua sobrevivência não ficar perfeitamente resolvida (existem nos rios norte-americanos barragens com até dois a três mecanismos para a passagem de peixes, sendo exigidas soluções para a subida e para a descida dos peixes).

Quirós (1989) comenta sobre o desenvolvimento dos mecanismos de transposição para peixes utilizados nos rios da América Latina. Alguns países, como Brasil, Argentina, Venezuela, Uruguai, Paraguai e Colômbia, já apresentam algumas escadas para peixes construídas em seus barramentos, além de outros mecanismos de transposição. No entanto, estes exemplos ainda são bastante reduzidos e pouco se conhece sobre a eficiência dos MTP, bem como as características natatórias da ictiofauna local.

2.2.2 No Brasil – Evolução Histórica

A primeira escada para peixes construída no Brasil foi implantada em 1911 na barragem da UHE Itaipava, Rio Pardo, entre os municípios de Santa Rosa de Viterbo e de Cajuru, Estado de São Paulo (Figura 2.1). Entre 1920 e 1922 foi construído um MTP na barragem de Cachoeira das Emas (Pirassununga/SP), sendo substituído em 1942 por uma escada em forma de degraus-tanque mais eficiente. Entre 1911 e 1985, segundo Godoy (1985), foram construídas 35 escadas para peixes no Brasil, todas do tipo degraus-tanques.

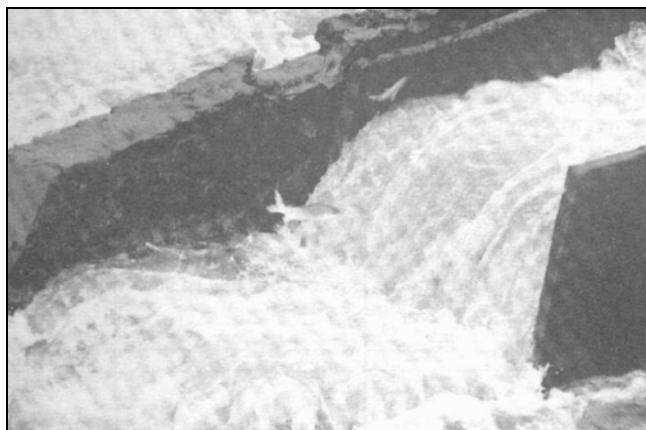


Figura 2.1 – Vista parcial da primeira escada para peixes construída no Brasil (1911), na Barragem de Itaipava, no Rio Pardo em Santa Rosa de Viterbo, SP. Fonte: Godoy (1985).

A Tabela 2.1 apresenta alguns dos MTP construídos no Brasil encontrados na literatura até 2006.

Tabela 2.1 – Alguns mecanismos de transposição de peixes no Brasil.

| Rio | Bacia/ local | Barragem/nome MTP | Altura (m) | Tipo | Ano de construção | Eficiência | Fonte |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|------------|------|-------------------|------------|--------------------------------|
| Pardo | do Prata | Itaipava | 7 | 1 | 1911 | + | Godoy (1985) |
| Sapucaí Paulista | SP/Guará | São Joaquim | < 8 | 1 | 1911 | | Martins (2000) |
| Jacará Guaçu | SP/São Carlos | Gavião Peixoto | < 8 | 1 | 1913 | | Martins (2000) |
| Mogi Guaçu | do Prata | Cachoeira de Emas | 3 | 1 | 1922 | - | Godoy (1985) |
| Sapucaí Mirim | SP/Mupuranga | Dourados | < 8 | 1 | 1926 | | Martins (2000) |
| Mogi Guaçu | do Prata | Cachoeira de Emas | 3-5 | 1 | 1943 | + | Godoy (1985) |
| Sorocaba | do Prata | Fazenda Cachoeira | 6 | 1 | 1942 | ? | Godoy (1985) |
| Tibagi | do Prata | Salto Mauá | 6 | 1 | 1943 | + | Godoy (1985); Quirós (1989) |
| Mogi Guaçu | do Prata | Cachoeira de Cima | 3 | 1 | ? | - | Quirós (1989) |
| Triunfo | PB/Antenor Navarro | Pilões | 4 | 1 | 1959 | ** | Martins (2000) |
| Piranhas | SP/Souza | São Gonçalo | 7 | 1 | 1960 | ** | Martins (2000) |
| Parapanema | do Prata | Piraju | 16 | 1 | 1971 | + | Godoy (1985); Quirós (1989) |
| Parapanema | do Prata | Uberlândia | ? | 1 | ? | + | Quirós (1989) |
| Tijuco | do Prata | Salto de Moraes | 10,5 | 1 | 1972 | ** | Godoy (1985) Martins (2000) |
| Paraná | do Prata | Ilha Grande | 20 | 1 | Projeto | | Godoy (1985) |
| Jacuí | Jacuí | Amarópolis | 5 | 1 | 1973 | + | Godoy (1985); Quirós (1989) |
| Jacuí | Jacuí | Anel de Dom Marco | | 1 | 1973 | + | Godoy (1985); Quirós (1989) |
| Jacuí | Jacuí | Fandango | 5 | 1 | 1973 | + | Godoy (1985); Quirós (1989) |
| Taquari | Jacuí | Bom Retiro do Sul | 9 | 1 | 1973 | + | Godoy (1985); Quirós (1989) |
| Pandeiros | | Pandeiros | | 1 | | * | Godoy (1985) |
| Itapocu | | Guaramirim | ~ 2 | 1 | 1985 | - | Godoy (1985) |
| Estado do Rio Grande do Norte | | Mendubim | 6,6 | 1 | 1973 | + | Quirós (1989) |
| Poço do Barro | | Poço do barro | 15 | 1 | 1980 | + | Godoy (1985) |

Tabela 2.1 – Alguns mecanismos de transposição de peixes no Brasil.

| Rio | Bacia/ local | Barragem/nome MTP | Altura (m) | Tipo | Ano de construção | Eficiência | Fonte |
|--------------|-----------------|--------------------|------------|------|-------------------|------------|----------------|
| Uruguai | Ijuí | PCH Linha 3 Leste | ** | ** | ** | ** | Própria |
| Uruguai | Ijuizinho | PCH Ijuizinho | ** | ** | ** | ** | Própria |
| Lago Guaíba | Jacuí | Fandango | 5 | 4 | 1973 | ** | Martins (2000) |
| Lago Guaíba | Jacuí | Anel de Dom Marco | 5 | 4 | 1973 | ** | Martins (2000) |
| Lago Guaíba | Jacuí | Amarópolis | 5 | 4 | 1973 | ** | Martins (2000) |
| Lago Guaíba | Taquari | Bom Retiro do Sul | ** | 4 | ** | ** | Martins (2000) |
| Lago Guaíba | Arroio Forqueta | PCH Salto Forqueta | ** | 3 | ** | ** | Própria |
| Paraná | PR/Itaipu | Itaipu | 27,3 | 1 | 1992 | ** | Martins (2000) |
| Mogi | SP/Mogi Guaçu | Mogi Guaçu | 10,5 | 1 | 1994 | ** | Martins (2000) |
| Grande | MG | Igarapava | 17 | 2 | 1999 | + | Própria |
| Paraná | SP | Sergio Motta | 20 | 5 | 1999 | ** | |
| Paraná | SP | Sergio Motta | 20 | 1 | 2001 | ** | Martins (2000) |
| Tocantins | MG/Lajeado | Lajeado | 30 | 1 | 2001 | ** | Martins (2000) |
| Tocantins | TO | AHE Peixe Angical | 39 | 1 | 2006 | + | Própria |
| Manoel Alves | TO | Manoel Alves | 22 | 1 | 2005 | + | Própria |
| Grande | MG | UHE Funil | 50 | 5 | 2005 | + | UHE Funil |
| Mucuri | MG/BA | UHE Santa Clara | 60 | 6 | 2002 | + | Pompeu (2006) |

Tipo de MTP: (1) escada do tipo soleira vertedoura (com ou sem orifício); (2) escada do tipo ranhura vertical; (3) outro tipo de escada; (4) eclusa de transposição; (5) elevador; (6) elevador com caminhão tanque.

Funcionamento: (+) bom funcionamento; (-) funcionamento insatisfatório; (?) desconhecimento sobre as condições de operação e funcionamento do mecanismo; (*) não está em operação porque o reservatório está quase totalmente assoreado (Godoy, 1985); (**) informação desconhecida.

Verifica-se nos últimos anos o aumento da pressão por parte dos órgãos ambientais, e mesmo da sociedade, por medidas que resolvam os problemas de transposição de peixes no Brasil. A legislação vem exigindo esse tipo de medida desde 1927, onde pela primeira vez comenta-se sobre o assunto. Nos últimos anos, essas exigências têm sido reforçadas, principalmente através da legislação estadual. A seguir, comenta-se sobre a evolução da legislação relacionada ao assunto no Brasil.

Em 1927, no Estado de São Paulo, a Lei nº 2.250 de 28/12/1927, no artigo 16 dispõe pela primeira vez sobre MTP: “Todos quantos, para qualquer fim, represarem as águas dos rios, ribeirões e córregos, são obrigados a construir escadas que permitam a livre subida dos peixes.

A nível federal foram instituídos alguns decretos e portarias. Em 1934, no Código de Águas (Decreto nº 24.643, de 10/07/1934), artigo 143 tem-se: “Em todos os aproveitamentos de energia hidráulica serão satisfeitas exigências acauteladoras dos interesses gerais:..... f) da conservação e livre circulação do peixe;

Em 1938, o Decreto-Lei nº 794, de 19/10/1938, do “Primeiro Código de Pesca”, dispõe, através do artigo 68, que “As represas dos rios, ribeirões e córregos devem ter, como complemento obrigatório, obras que permitam a conservação da fauna fluvial, seja facilitando a passagem dos peixes, seja instalando estações de piscicultura.”

A Lei Delegada nº 10, de 11/10/1962, cria a Superintendência do Desenvolvimento da Pesca (SUDEPE) a quem compete aplicar o Código da Pesca e a legislação das atividades ligadas à pesca e aos recursos pesqueiros.

Em 1967, o Decreto-Lei nº 221, de 25/2/1967, dispõe sobre a proteção e estímulos à pesca e dá outras providências no Artigo 36: “Os proprietários ou concessionárias de represas em cursos d’água, além de outras disposições legais, são obrigados a tomar medidas de proteção à fauna.”

A Portaria N-0001/7, de 04/1/1977, resolve, a partir do Artigo 19, que “As barragens que implicarem na alteração de cursos d’água serão construídas com a observância das medidas de proteção à fauna aquática indicadas pela SUDEPE.”

Mais recentemente, alguns estados têm regulamentado sobre a obrigatoriedade da construção de mecanismos de transposição para peixes. No Estado do Pará, a Lei nº 5.886, de 5 de abril 1995, obriga a construção de escadas para peixes em barramentos (Pará, 1995). No Estado de Minas Gerais, tem-se a Lei nº 12.488, de 09/04/1997, que torna obrigatória a construção de escadas para peixes em barragem a ser edificada em curso d’água no domínio do Estado, exceto quando, em virtude das características do projeto, a medida for considerada ineficaz. De acordo com essa lei, as barragens já existentes teriam o prazo de cinco anos para se adaptarem à legislação. Além da Lei nº 12.488, o artigo 20º do Decreto Lei nº 38.744, da mesma data, 09/04/1997, determina que para o licenciamento ambiental de novas usinas hidrelétricas, é exigida a construção desses mecanismos (Minas Gerais, 1997a e Minas Gerais, 1997b). No Estado de São Paulo, foi promulgada em 7 de outubro de 1997 a Lei nº 9.798 que obriga a construção de escadas para peixes em barragens edificadas ou a serem implantadas no domínio do Estado. Quanto às barragens já existentes, dependerá de parecer técnico exarado pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente - CONSEMA, de acordo com as características do projeto (São Paulo, 1997). No Espírito Santo, o Decreto Normativo 4.489-N, de 15 de julho de 1999, regulamenta a implantação de mecanismos de transposição de peixes nos cursos de rio do Estado (Espírito Santo, 1999).

Nos demais Estados brasileiros ainda não existem leis específicas que obriguem a implantação de MTP.

Desde os primeiros MTP construídos no Brasil até os dias de hoje, muito se tem questionado a eficiência dos MTP. Em alguns casos, experiências mal sucedidas levam a generalização de conclusões. Machado *et al.* (1968) *apud* Godoy (1985) afirmam que as escadas são “onerosas e anti-biológicas, não sendo eficientes em barragens de altura superior a 6 – 8 metros”. Torloni (1984) *apud* Godoy (1985) relata que “as escadas em barragens com altura superior a 8 m tornam-se ineficientes, pois são raros os peixes que conseguem galgar o nível de montante,...”.

Por esses motivos que cada vez mais se torna fundamental a pesquisa sobre os MTP e a capacidade natatória dos peixes presentes nos rios brasileiros. Nos últimos dez anos, várias pesquisas sobre MTP vêm sendo desenvolvidas no Brasil buscando entender esses mecanismos, entre estes trabalhos podem ser citados: Martins (2000), Magalhães (2004), Junho e Tamada (2004), Viana (2005), Coletti (2005) e Martins (2005). Mais recentemente, algumas pesquisas começaram a avaliar as características natatórias de espécies de peixes presentes nos rios brasileiros, podem-se citar neste grupo: Santos (2004), Vicentini (2005) e Santos (2007).

Sabe-se que embora muitos desses MTP não apresentem um desempenho satisfatório, outros dispositivos vem operando com sucesso. Um exemplo é a escada para peixes da UHE Igarapava, que vence um desnível de quase 19 m, onde se observa desde o início da sua operação, em 1999, que várias espécies têm conseguido utilizá-la (Vono, 2001).

Mais recentemente, outros MTP do tipo escada para peixes entraram em operação no Brasil, podendo-se citar as estruturas construídas nas barragens Manoel Alves (Figura 2.2) e na UHE Peixes (Figura 2.3), ambas do tipo bacias sucessivas com descarregadores e orifícios.

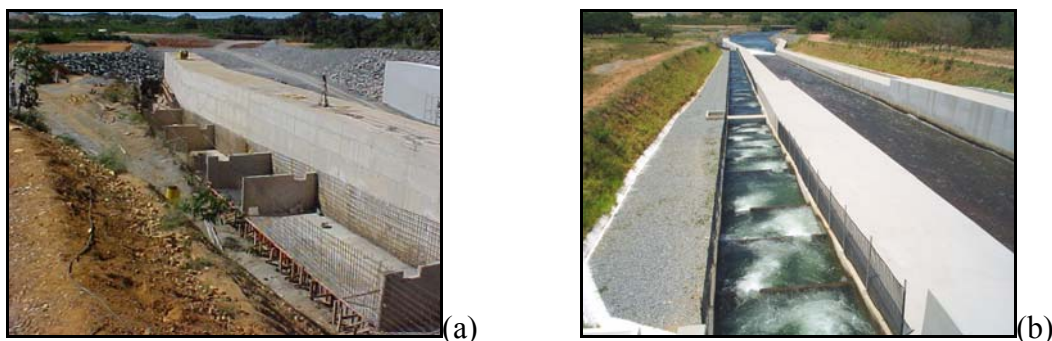


Figura 2.2 – Escada para peixes da barragem Manoel Alves, com orifícios de fundo e descarregadores de superfície (a) fase construtiva; (b) em funcionamento em 2006.

Fonte: Cortesia da Magna Engenharia Ltda.



Figura 2.3 – Vista de montante para jusante da escada para peixes da UHE Peixe Angical (TO).

2.3 Tipos de Mecanismos de Transposição de Peixes

Considerando-se a grande variedade de estruturas e sistemas utilizados para a transposição de peixes, de uma forma geral, eles podem ser classificados da seguinte maneira:

- escadas para peixes ou passagens por bacias sucessivas:
 - o com soleiras vertedouras;
 - o com septos e ranhuras verticais;
 - o com orifícios;
 - o sistemas mistos.
- passagens tipo Denil;
- rios artificiais;
- eclusas de navegação;
- eclusas para peixes;
- elevadores para peixes;
- captura, transporte e soltura.

Estas são medidas que procuram conjugar os interesses da existência dos barramentos com a manutenção das comunidades de peixes. No entanto, em algumas soluções mais radicais, que primam pela sustentabilidade das espécies migratórias, inclui-se nas possibilidades a remoção do obstáculo, no caso, do barramento, segundo Chiu *et al.* (2002).

A seguir comenta-se sobre as principais características de cada um destes sistemas/medidas, apresentando as aplicações, restrições e alguns exemplos.

2.3.1 Escadas para Peixes ou Passagens para Peixes por Bacias Sucessivas

Escadas para peixes são, de uma forma geral, passagens de água através de obstruções ao curso do rio, projetadas para dissipar a energia do escoamento de modo a permitir a passagem dos peixes sem esforço excessivo (Clay, 1995).

As escadas para peixes caracterizam-se por uma sucessão de piscinas separadas por paredes com soleiras vertedouras, ranhuras verticais ou orifícios submersos, responsáveis por distribuir a carga total em quedas sucessivas (CBDB, 1999).

Esses mecanismos de transposição são utilizados frequentemente em barramentos de baixa queda, dificilmente sendo implantados em quedas superiores a 30 metros, por motivos de tempo de viagem dos peixes e por fatores econômicos. Na Noruega, implantou-se uma escada para peixes numa queda de 46 m, que é a estrutura deste tipo com maior desnível que se conhece, e que apresenta funcionamento satisfatório, de acordo com CBDB (1999).

Cada escada para peixes deve ser construída de acordo com a ictiofauna local. O tipo de peixe que utilizará o mecanismo define a perda de carga entre piscinas sucessivas e a forma e a dimensão das aberturas. O tamanho das ranhuras ou orifícios nas paredes refletoras determina as condições hidráulicas do sistema. O Comitê Brasileiro de Barragens publicou uma tradução do boletim 116 (CBDB, 1999), publicado originalmente pelo Comitê Internacional de Grandes Barragens (CIGB / ICOLD). Nesse boletim apresenta-se a Tabela 2.2, com recomendações de desníveis e velocidades máximas admitidas para algumas espécies presentes no continente europeu e nos Estados Unidos.

As velocidades máximas dos peixes dependem da espécie, do tamanho e ainda da temperatura da água. Segundo CBDB (1999), quanto maior a temperatura da água, maior será a velocidade atingida pelo peixe, considerando os limites de sua preferência térmica. No item 2.7 comenta-se sobre as características natatórias dos peixes.

O dimensionamento das piscinas deve ser realizado considerando o número de peixes que atravessa a estrutura. De acordo com o CBDB (1999), o volume da piscina deve ser de $0,12 \text{ m}^3$ de água por quilo de peixe. Normalmente a piscina apresenta de 1 a 3 m de largura, para proporcionar zonas de descanso (correntes suaves e de baixa turbulência) entre os obstáculos. A largura da piscina deve ser pelo menos três vezes o comprimento do peixe que a utiliza.

A declividade das escadas para peixes variam geralmente entre 5 e 12%, dependendo das espécies de peixes a serem transportadas. A escada para peixes pode estar em linha reta ou pode ser construída num arranjo tortuoso, com curvas e dobras ou até mesmo espiral para torná-la mais compacta, conforme pode ser observado na Figura 2.4. Se a escada tiver desvios

de direção, esses devem ser curvos, evitando o uso de ângulos retos, que poderiam desorientar os peixes durante o percurso.

Tabela 2.2 – Desnível e velocidades máximas admitidas para algumas espécies de peixes (Fonte: CBDB, 1999).

| Queda entre piscinas sucessivas (m) | Velocidade máxima na seção contraída (m/s) | Espécies-alvo |
|-------------------------------------|--|--|
| 0,10 | 1,2 | Espécies com velocidade de natação baixa |
| 0,15 | 1,7 | Espécies carnívoras, alosa cinzenta |
| 0,30 | 2,4 | Truta, escalo, barbo |
| 0,45 | 3,0 | Truta do mar |
| 0,60 | 3,5 | Grandes salmonídeos |

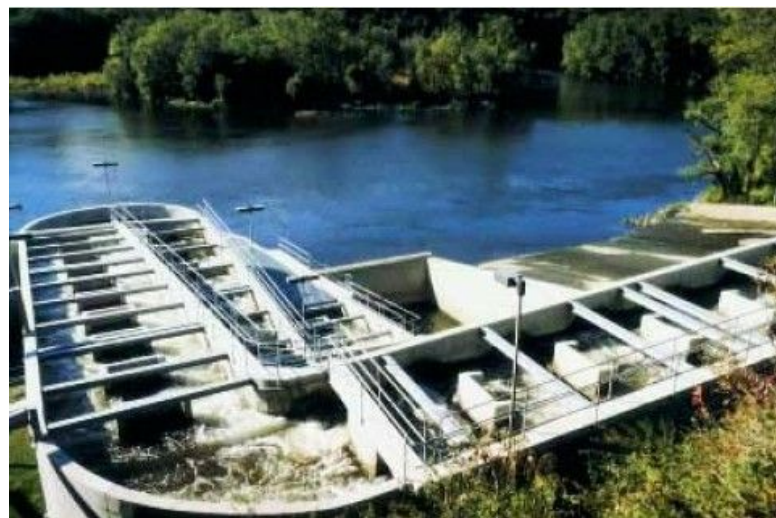


Figura 2.4 – Vista da escada para peixes construída no Rio Connecticut, nas Turner Falls, com curva e dobra para torná-la mais compacta. Foto: Larinier (2001).

A vazão da escada para peixes depende da diferença de nível entre as piscinas e do tipo das paredes defletoras (soleira vertedoura, ranhura ou orifícios). Os valores variam entre 0,2 a 2 m³/s (CBDB, 1999). Se a vazão necessária for muito pequena, pode-se optar pelo uso de um fluxo adicional na entrada da escada, para melhorar as condições de atração dos peixes.

Quando as variações de nível forem significativas ao longo do período em que forem utilizadas (época de migração), devem-se projetar diferentes entradas e/ou saídas para que a escada cumpra sua função independente dessas variações hidrológicas.

A seguir trata-se separadamente algumas particularidades das escadas para peixes com soleira vertedouras, ranhura vertical e orifício, sendo que ainda podem ser construídas estruturas com configurações mistas.

2.3.1.1 Escadas com soleira vertedoura

Este tipo de estrutura caracteriza-se por uma série de tanques separados por defletores dotados de vertedouros. O escoamento passa de um tanque a outro através desses descarregadores de superfície (Rajaratnam *et al.*, 1988).

A utilização desse MTP depende das características natatórias do peixe: peixes como o salmão e a truta podem saltar de um tanque a outro, enquanto que peixes que não possuem esta capacidade, provavelmente terão que utilizar a sua velocidade de explosão (“*burst*”) para nadar no fluxo sobre o vertedouro (Rajaratnam *et al.*, 1988).

As primeiras escadas para peixes construídas são do tipo soleira vertedoura e, ainda hoje, estas são muito utilizadas, algumas vezes com a combinação de construção de orifícios nas paredes do vertedouro (Rajaratnam *et al.*, 1988). Existem estruturas desse tipo com as mais diferentes geometrias, desde as mais simples, cuja soleira vertedoura ocupa toda a largura do canal, até as mais elaboradas com diferentes combinações de descarregadores e orifícios. A Figura 2.5 apresenta alguns exemplos de geometrias de escadas para peixes com defletores dotados de descarregadores e orifícios.

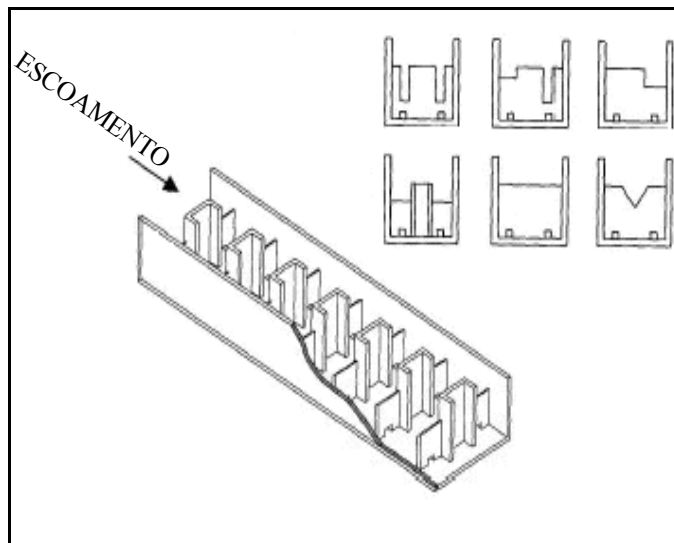
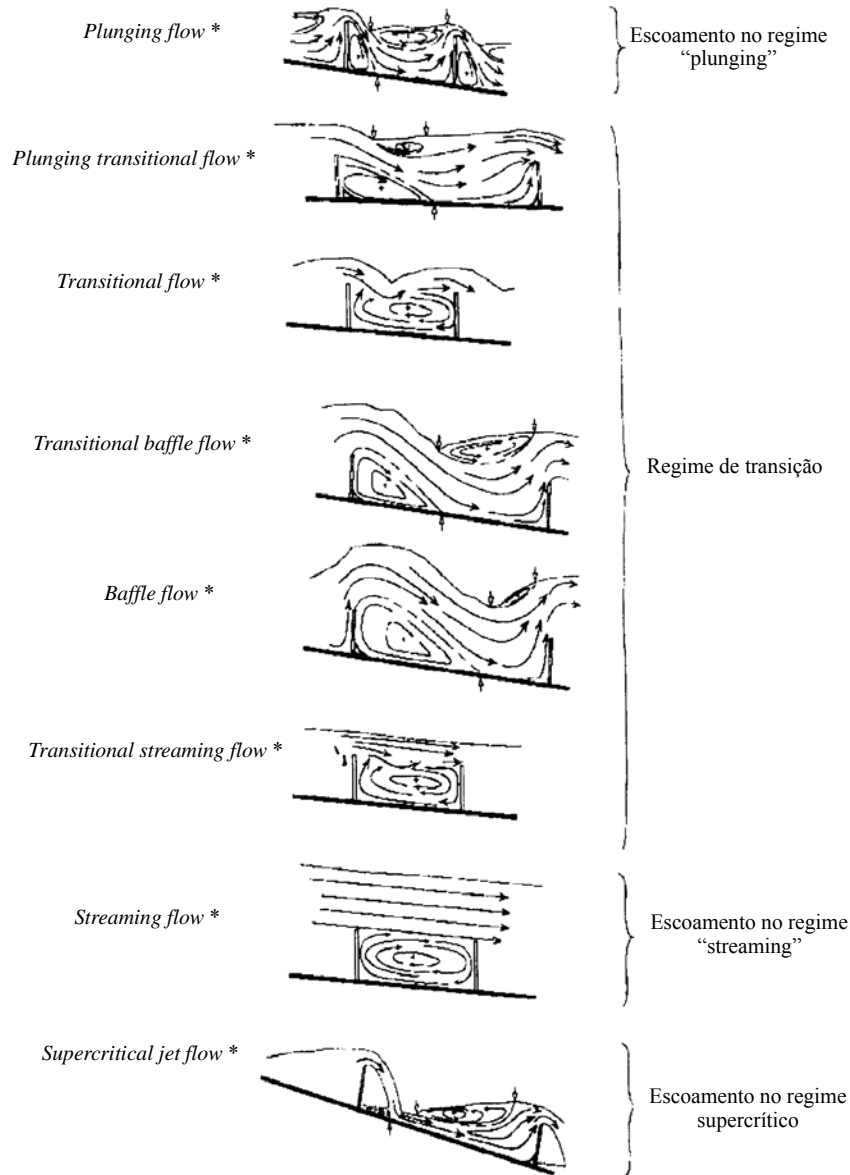


Figura 2.5 – Geometrias de defletores de escadas para peixes com combinações de descarregadores e orifícios. Fonte: Adaptado de Odeh (1999a).

Clay (1961) e (1995) classifica o escoamento que passa em escadas para peixes do tipo soleira vertedoura em dois tipos: “*plunging*” e “*streaming*”. Esta classificação, geralmente é válida, para situações em que a soleira vertedoura ocupa toda a largura do canal da escada para peixes.



* Seguindo a nomenclatura proposta por Ead *et al.* (2004)

Figura 2.7 – Regimes de escoamento em escadas para peixes do tipo piscinas/vertedouros segundo Ead *et al.* (2004). Adaptado de Ead *et al.* (2004).

A tensão de cisalhamento ($\bar{\tau}$) pode ser escrita de acordo com a Eq. (2.2).

$$\bar{\tau} = C_f \frac{\rho \cdot V^2}{2} \tag{2.2}$$

onde: C_f é o coeficiente de cisalhamento; ρ é a massa específica da água e V é a velocidade característica.

A Eq. (2.1) pode ser reduzida a Eq. (2.3).

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot S_0 \cdot b^2 \cdot d^3}} = \sqrt{\frac{2}{C_f}} \tag{2.3}$$

Sendo: Q a vazão; Q^* a vazão adimensional; g a aceleração da gravidade e b a largura da soleira vertedoura.

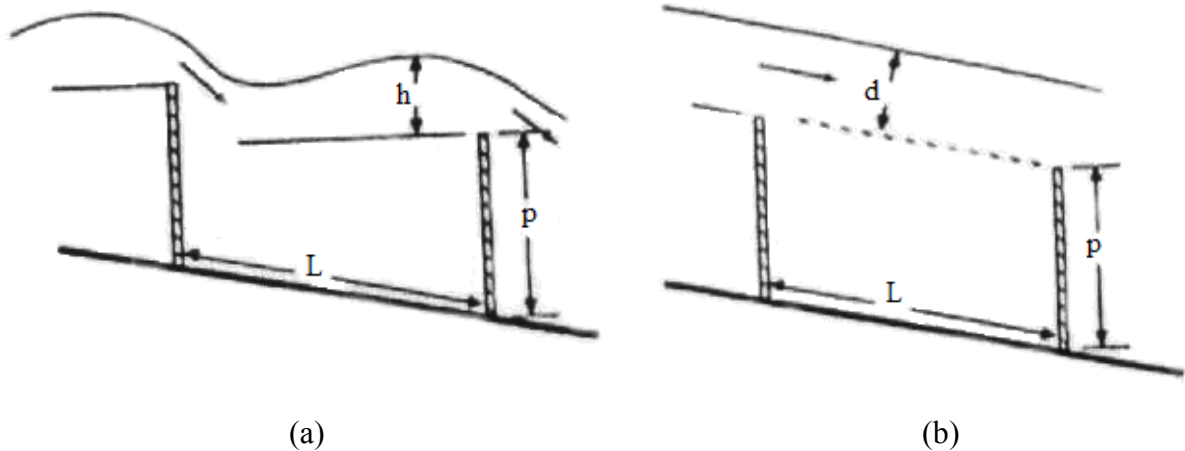


Figura 2.8 – Simplificações do escoamento em escadas para peixes do tipo soleira vertedoura:

(a) escoamento do tipo “*plunging*”; (b) escoamento do tipo “*streaming*”.

Fonte: Adaptado de Rajaratnam *et al.* (1988)

Para o regime do tipo “*plunging*”, quando o escoamento sobre o descarregador é não-afogado, a vazão pode ser equacionada por:

$$Q = \frac{2}{3} b \cdot C_d \sqrt{2 \cdot g \cdot h^3} \quad (2.4)$$

e a vazão adimensional (Q_+), pela equação (2.5):

$$Q_+ = \frac{Q}{b \cdot \sqrt{g \cdot h^3}} = \frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot C_d \quad (2.5)$$

em que h é a profundidade dada pela Figura 2.8a.

Rajaratnam *et al.* (1988) utilizaram modelos experimentais para tentar definir quando o escoamento passa do tipo “*plunging*” para o tipo “*streaming*”. O modelo utilizado por esses autores representou uma escada para peixes do tipo soleira vertedoura com 9 tanques, com largura de 0,31 m; comprimento dos tanques variados (0,18; 0,38 e 0,57 m) e altura do vertedouro 0,21 m. Foram testadas quatro declividades do canal: 2%, 5%, 10% e 15%.

A avaliação da passagem entre o regime de escoamento “*plunging*” para o “*streaming*” foi realizada visualmente, utilizando a injeção de corantes. Rajaratnam *et al.* (1988) observaram que essa transição ocorreu antes para os menores comprimentos de tanque e para as menores declividades da escada.

A Eq. (2.6) apresenta a expressão encontrada por Rajaratnam *et al.* (1988) para definir a transição entre os regimes “*plunging*” e “*streaming*”.

$$\hat{Q}_t = \frac{Q_t}{\sqrt{g \cdot b \cdot S_0 \cdot L^{3/2}}} \quad (2.6)$$

sendo: Q_t a vazão de transição entre os regimes “*plunging*” e “*streaming*” e \hat{Q}_t um valor adimensional que variou entre 0,22 e 0,31, com um valor médio igual a 0,25.

Larinier (1992) propõe a equação (2.7) para a descarga que passa por uma escada para peixes com descarregador não-afogado (Figura 2.9).

$$Q = C_d \cdot b \sqrt{2 \cdot g} \cdot H_1^{3/2} \quad (2.7)$$

Onde: H_1 é a diferença do nível de água a montante do descarregador e a cota da crista, conforme Figura 2.9a, que é idêntica a equação (2.4), com a diferença que nesta equação o coeficiente de descarga engloba a constante apresentada na equação (2.4).

Para situações do jato semi-afogado, em condições de submergência moderada ($H_2/H_1 < 0,9$), Larinier (1992) propõe:

$$Q_n = K \cdot Q_d \quad (2.8)$$

Sendo: Q_n a vazão que passa por um descarregador semi-afogado, Q_d a vazão em um mesmo descarregador, em situação de escoamento livre (não-afogado) e pode ser obtida pela equação (2.7) e K é um coeficiente que indica a redução de vazão devido a submergência (afogamento) do jato que passa pelo descarregador, dado pela equação (2.9).

$$K = \left[1 - \left(\frac{(H_1 - \Delta h)}{H_1} \right)^2 \right]^{0,385} \quad (2.9)$$

Sendo H_1 o mesmo considerado para o escoamento com jato livre, ou seja, a diferença entre nível d’água a montante e a crista do descarregador e Δh é a diferença entre os níveis d’água a montante e a jusante do vertedor, conforme Figura 2.9b.

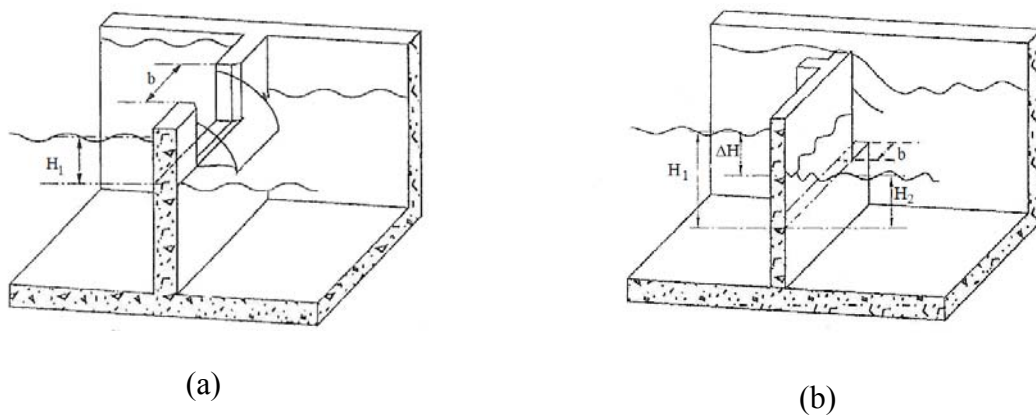


Figura 2.9 – Tipos de escoamentos em escadas para peixes com descarregador: (a) livre ou não-afogado; (b) semi-afogado. Fonte: Adaptado de Larinier (1992).

Ead *et al.* (2004) verificaram que os perfis de velocidade são similares independente do escoamento estar no regime “*plunging*” ou “*streaming*”. Ead *et al.* (2004) avaliaram a perda de energia do escoamento ao longo da distância longitudinal de um tanque. No escoamento do tipo “*plunging*”, a perda de energia ocorre, quase 90% do total, nos primeiros 25% do tanque. No escoamento do tipo “*streaming*”, a taxa de dissipação de energia demonstrou-se uniforme ao longo de todo o comprimento da bacia.

A Figura 2.2 mostra um exemplo de escada para peixes com soleira vertedoura, instalada na barragem Manoel Alves no Estado de Tocantins. Essa escada apresenta defletores com a passagem da água através de orifícios de fundo e de descarregadores de superfície posicionados em cantos opostos em um mesmo defletor. Os defletores são instalados de forma que em paredes consecutivas têm-se as aberturas em lados alternados, conforme pode ser observado na Figura 2.2. Esse tipo de configuração geométrica beneficia tanto espécies de fundo como espécies que apresentam preferências por saltar obstáculos.

Na Figura 2.3 apresenta-se outro mecanismo deste tipo, instalado na UHE Peixe Angical, onde cada defletor é composto por dois descarregadores, além de orifícios de fundo, sendo que o posicionamento das aberturas é de forma alternada entre defletores consecutivos.

2.3.1.2. Escadas com orifícios

Escadas para peixes com orifícios, como as com ranhuras verticais, são mecanismos que se adaptam bem às variações de nível. Esse tipo em especial apresenta como desvantagem a facilidade da obstrução do orifício, sendo a sua manutenção bastante delicada.

Muitas vezes esse tipo é utilizado em conjunto com as escadas para peixes com soleira vertedoura. A colocação de orifícios na parede dos vertedouros pode facilitar a passagem de peixes que não conseguem ultrapassar, nadando ou saltando, o fluxo acima da soleira do vertedouro.

A vazão que passa exclusivamente por uma escada para peixes com orifícios é dada pela equação (2.10):

$$Q = C_d \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (2.10)$$

Sendo: C_d o coeficiente de descarga do orifício, A a área dos orifícios, g a aceleração da gravidade e Δh a diferença de nível entre tanques consecutivos.

2.3.1.3 Escadas com ranhuras verticais

A escada para peixes do tipo ranhura vertical foi desenvolvida por volta de 1943 por Milo C. Bell para ser utilizada na Hell's Gate no Rio Fraser, no Canadá (Clay, 1995).

Uma escada para peixes do tipo ranhura vertical consiste em um canal retangular, inclinado, dividido por defletores formando vários tanques. A água escoava de um tanque a outro passando por ranhuras verticais. O escoamento forma um jato na ranhura e a energia do jato é dissipada pela mistura da água no tanque (Rajaratnam *et al.*, 1986).

As escadas para peixes com ranhuras verticais são mais adequadas para peixes que nadam na corrente (não saltadores), pois estas apresentam a capacidade de adaptação às variações de nível maior do que as do tipo soleira vertedoura. Essas estruturas podem apresentar diferentes tamanhos e disposição das ranhuras, dependendo da capacidade natatória dos peixes que irão utilizá-las. A Figura 2.10 apresenta a configuração geral de uma escada para peixes do tipo ranhura vertical simples e com ranhuras verticais duplas. A definição da geometria desses mecanismos deve ser realizada através de estudos hidráulicos em conjunto com a ictiofauna do local de implantação.

A Figura 2.11 mostra alguns exemplos de escadas com ranhuras verticais.

Sendo Δh a diferença de níveis entre dois tanques consecutivos, procura-se projetar a escada para peixes para um determinado valor de Δh , que depende das velocidades características dos peixes que utilizarão a escada. De um modo geral, admite-se que o valor de Δh é constante ao longo de todo o canal, ou seja, pode ser obtido dividindo a queda total pelo número de tanques.

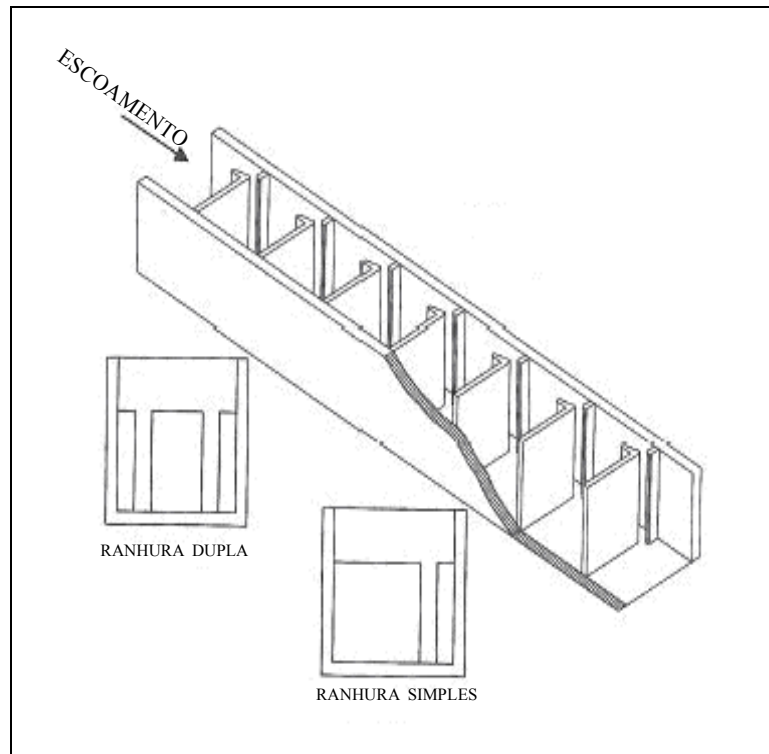


Figura 2.10 – Configuração geral de uma escada para peixes do tipo ranhura vertical simples e ranhura vertical dupla. Fonte: Adaptado de Odeh (1999a).

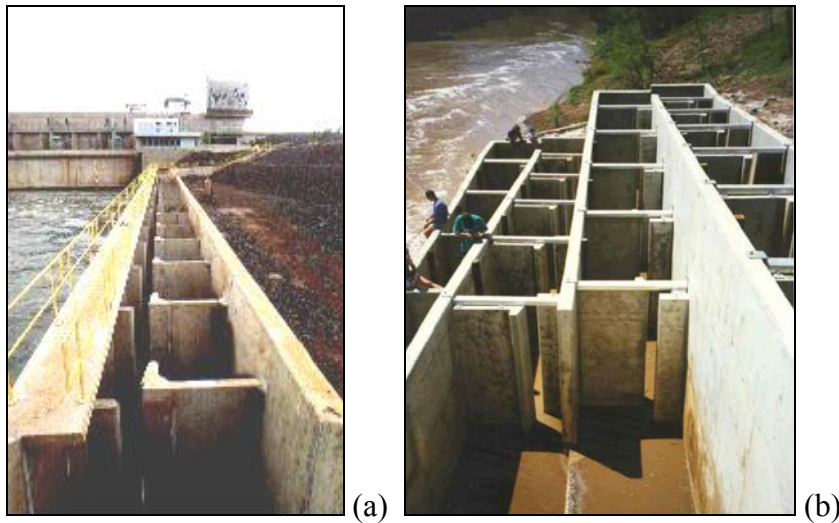


Figura 2.11 – Exemplos de escadas para peixes com ranhuras verticais: (a) UHE Igarapava (Fonte: www.uhe-igarapava.com.br); (b) em construção na Austrália (Fonte: Pena, 2004).

Rajaratnam *et al.* (1986) procuraram realizar ensaios em regime “uniforme”, onde a profundidade média em cada um dos tanques não varia ao longo de todo canal e conseqüentemente, Δh é aproximadamente constante (Figura 2.12). Mas os autores também observaram condições de escoamento gradualmente variadas com a formação dos perfis M1 e M2. Estes perfis foram analisados pelos autores utilizando a teoria de Bakhmeteff-Chow (Chow, 1959).

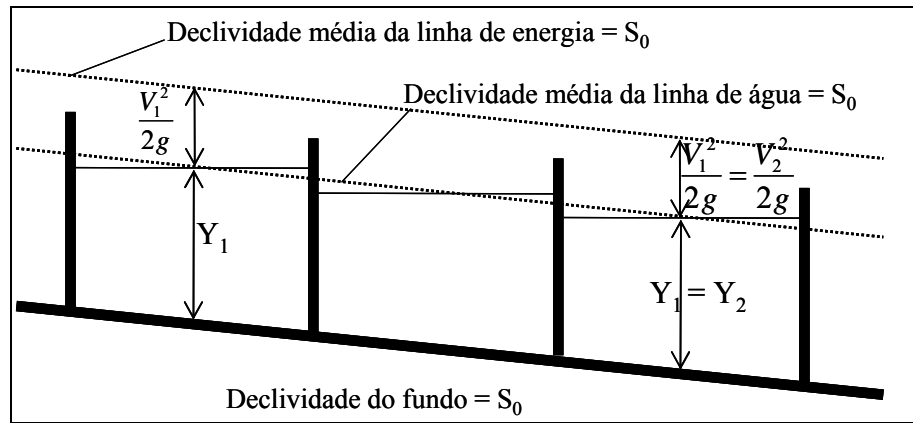


Figura 2.12 – Representação do escoamento uniforme em uma escada para peixes.

Fonte: Adaptado de Kamula (2001).

Rajaratnam *et al.* (1986), considerando o escoamento uniforme, realizaram a seguinte análise dos esforços atuantes no escoamento, conforme apresentado na Figura 2.13.

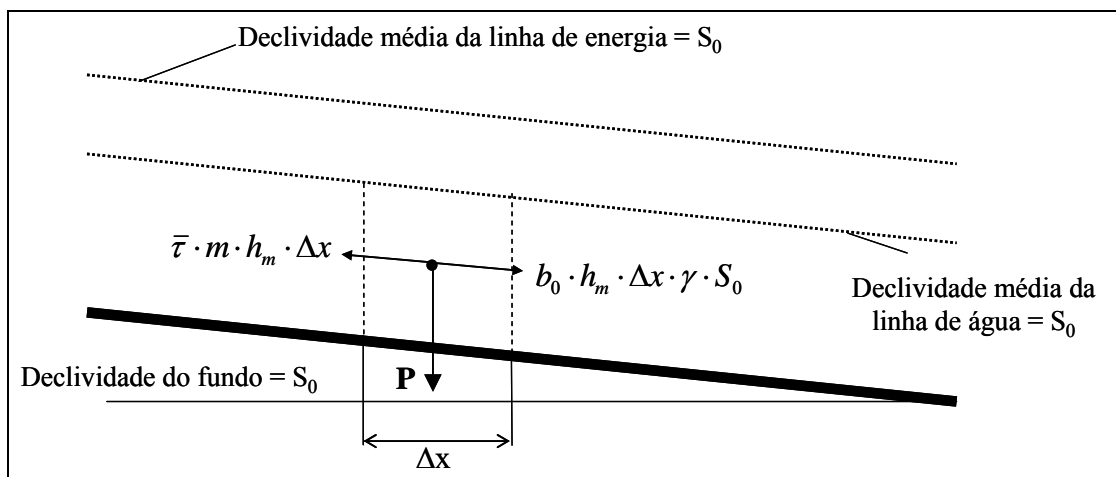


Figura 2.13 - Esquema dos esforços envolvidos no escoamento “uniforme” em escadas para peixes.

Tem-se que o peso do volume de controle (P) é:

$$P = \Delta x \cdot b_0 \cdot h_m \cdot \gamma \quad (2.11)$$

decompondo no plano paralelo ao fundo do canal, e igualando às forças que se opõem ao movimento tem-se:

$$b_0 \cdot h_m \cdot \Delta x \cdot \gamma \cdot S_0 = \bar{\tau} \cdot m \cdot h_m \cdot \Delta x \quad (2.12)$$

sendo: b_0 a largura da ranhura; h_m a profundidade do escoamento uniforme; γ o peso específico; S_0 a declividade do canal; $\bar{\tau}$ a tensão de cisalhamento entre as correntes do jato (que passam pela ranhura) e a recirculação do tanque; m um coeficiente que depende da

geometria da ranhura ($m = 1$, quando a corrente (jato) tem de um lado parede e de outro fluido (desenhos 3, 4, 5 da Figura 2.34) e $m = 2$, quando há fluido contornando o jato principal dos dois lados (figuras 1, 2, 6 e 7 da Figura 2.34)).

A tensão de cisalhamento pode ser obtida por:

$$\bar{\tau}_0 = C_f \frac{\rho \cdot V^2}{2} \quad (2.13)$$

onde: C_f é o coeficiente de cisalhamento; ρ é a massa específica da água e V é a velocidade característica.

Substituindo a Eq. (2.13) na Eq. (2.12), obtém-se a seguinte expressão:

$$V^2 = \frac{2 b_0 \cdot S_0 \cdot g}{m C_f} \quad (2.14)$$

A Eq. (2.14) pode ser expressa pela Eq. (2.15) onde surge a relação para a vazão adimensional (Q^*) para escadas para peixes do tipo ranhura vertical simples (apenas uma ranhura).

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot S_0 \cdot b_0^5}} = \frac{y_0}{b_0} \sqrt{\frac{2}{m \cdot C_f}} \quad (2.15)$$

Kamula (2001) propôs a Eq. (2.16) para a avaliação da vazão adimensional em escadas para peixes do tipo ranhura vertical, diferente da proposta por Rajaratnam *et al.* (1986).

$$Q^{**} = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot S_0 \cdot b_0^2 L^3}} \quad (2.16)$$

Sendo Q^{**} a vazão adimensional proposta por Kamula (2001).

Puertas *et al.* (2004) propuseram a Eq. (2.17) para a vazão adimensional (Q^A), sendo que nesta não se considera a declividade da escada e o comprimento do tanque.

$$Q^A = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot b_0^5}} \quad (2.17)$$

A potência dissipada por unidade de volume (ε) na piscina pode ser obtida pela equação (2.18), que indica a eficiência na dissipação de energia para cada tipo de geometria.

$$\varepsilon = \frac{Q \cdot \gamma \cdot \Delta h}{\text{volume do tanque}} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot \Delta h}{B \cdot L \cdot h_m} \quad (2.18)$$

Onde: Q é a vazão (m^3/s); γ é o peso específico da água (kgf/m^3); Δh é o desnível entre piscinas (m); B é a largura do tanque; L é o comprimento e h_m é a profundidade média do escoamento (m).

O coeficiente de descarga para as ranhuras foi proposto por Andrew (em um relatório não publicado, 1948) e Clay (1961) *apud* Rajaratnam *et al.* (1986) e pode ser obtido pela equação:

$$C_d = \frac{Q}{b_o \cdot \bar{y} \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}} \quad (2.19)$$

sendo \bar{y} a profundidade do escoamento na ranhura na parte a montante (Figura 2.14). Os principais fatores que alteram o coeficiente de descarga são a forma do tanque e da ranhura. A suavização das formas da ranhura a montante aumenta o coeficiente de descarga destas estruturas. Segundo Larinier (2002c) esse valor varia entre 0,65 e 0,85.

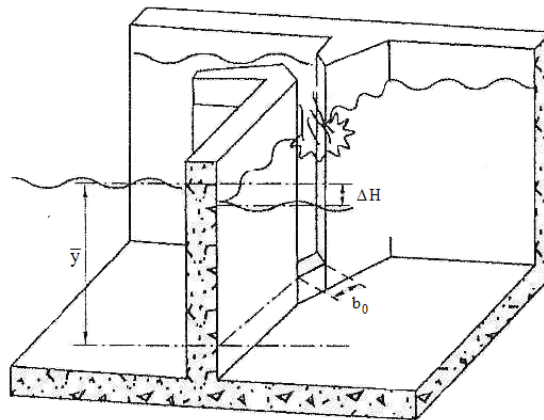


Figura 2.14 – Definição das variáveis utilizadas para calcular o coeficiente de descarga, segundo Rajaratnam *et al.* (1986). Fonte: Adaptado de Larinier (2002c).

2.3.2 Passagens tipo Denil

A passagem do tipo Denil foi desenvolvida inicialmente na Bélgica, no ano de 1910, para a transposição de salmão. Em 1940 passou a ser utilizada nos Estados Unidos, e nos anos 80, na França, Canadá e Dinamarca (Marmulla, 2001). As passagens do tipo Denil (algumas vezes classificada como uma variedade de escada para peixes) são constituídas por um canal reto em declive com defletores que reduzem a velocidade do escoamento. Os defletores podem ter diferentes geometrias e normalmente são fixados a 45° em relação ao plano do fundo do canal. Esses defletores de diferentes formas causam correntes secundárias helicoidais que asseguram uma eficiente dissipação de energia por transferência de momento (Marmulla, 2001). Esse tipo de passagem é instalada, normalmente, em canais com declividades entre 15 e 20%. Diferencia-se das escadas para peixes por apresentarem escoamento mais turbulento e serem mais sensíveis às variações de nível. Podem ser previstas piscinas de descanso ao longo do canal.

Esse tipo de MTP é mais econômico na implantação do que escadas para peixes, porém seu uso restringe-se a espécies mais robustas (salmonídeos). O espaçamento entre defletores deve ser proporcional ao comprimento dos peixes que a utilizam. Devido aos padrões do escoamento, geralmente peixes com mais de 30 cm de comprimento utilizam esta passagem (Marmulla, 2001).

A Figura 2.15 apresenta o esquema de um defletor de uma passagem tipo Denil e sua disposição ao longo do canal.

Estudos experimentais sobre MTP do tipo Denil foram realizados por Katopodis e Rajaratnam (1983), Rajaratnam e Katopodis (1984), Rajaratnam *et al.* (1997), Katopodis *et al.* (1997), Kamula e Bärthel (2000), Mallen-Cooper e Stuart (2007), entre outros.

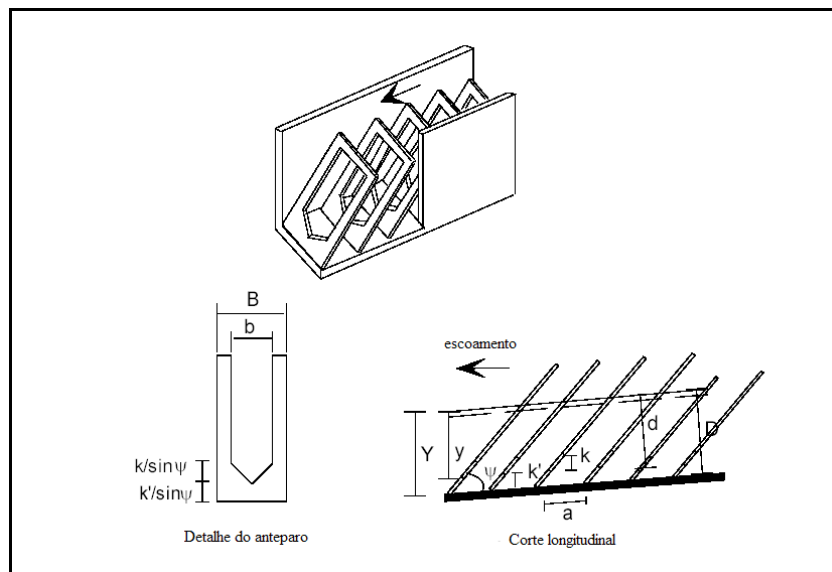


Figura 2.15 – Esquema de uma passagem tipo Denil. Fonte: Adaptado de Kamula (2001).

2.3.3 Rios Artificiais ou Canais Naturalizados

Para baixas quedas, quando o nível de montante não varia muito, pode-se construir um rio artificial contornando a barragem. Esse parece ser o método mais eficiente, pois mais se aproxima das condições naturais. Mas como devem ser construídos com baixas declividades (1 a 2%, CBDB, 1999), geralmente esse mecanismo limita-se ao uso em pequenas quedas, por razões econômicas. A Figura 2.16 mostra um exemplo deste tipo de MTP.



Figura 2.16 – MTP do tipo rio artificial no rio Siikajoki na Finlândia. Fonte: Larinier (2001)
Foto: Marmulla.

No Brasil, tem-se o exemplo do rio artificial construído para vencer os 120 metros de desnível da barragem da Itaipu Binacional. Esse canal de piracema apresenta aproximadamente 8 km de extensão, e além da transposição dos peixes, foi construído com a proposta de utilização para a prática de esportes. A Figura 2.17 mostra essa estrutura.



Figura 2.17 – Canal de piracema da Itaipu Binacional. Fonte: www.itaipu.gov.br.

2.3.4 Eclusas

Uma eclusa para peixes é formada por uma piscina inferior, no pé da barragem e uma superior ligada ao reservatório. Essas piscinas possuem comportas e são ligadas por um poço vertical (câmara da eclusa) ou por condutos de grande declividade. Para que os peixes sejam atraídos para a piscina inferior, cria-se uma corrente pela abertura da comporta a montante. Após algum tempo, a comporta inferior é parcialmente fechada, permitindo que o poço ou

conduto se encha. A comporta de montante é aberta, permitindo que os peixes nadem para o reservatório.

Em alguns casos são instaladas grades que empurram os peixes para dentro da eclusa, obrigando-os a subirem e nadarem para fora da piscina superior. As grades evitam que os peixes fiquem, após o enchimento, desorientados e consigam encontrar o nível superior mais rapidamente.

Em barragens que possuem eclusas de navegação, a transposição dos peixes pode ser realizada através destas, a partir de algumas adaptações.

Primeiramente deve-se criar uma corrente que induza os peixes para dentro da eclusa enquanto a comporta de jusante estiver aberta. Esta corrente pode ser obtida abrindo parcialmente as comportas que controlam o fluxo de água para a câmara. Quando os peixes estiverem dentro da câmara, a comporta de jusante é fechada, e a câmara é preenchida até o nível de montante. A comporta de montante é então aberta e as comportas de descarga de fundo são parcialmente abertas para criar um fluxo que atraia os peixes para fora da eclusa (CBDB, 1999).

O inconveniente desse mecanismo é que normalmente o tempo necessário nas operações para transposição de peixes é maior do que para a transposição da navegação, atrasando o tráfego nos rios.

O tempo de operação das eclusas para peixes deve ser determinado experimentalmente em função das espécies que utilizam a eclusa (CBDB, 1999).

A Figura 2.18 mostra o princípio de operação de uma eclusa para peixes. A Figura 2.19 o esquema de uma eclusa para peixes construída nos EUA.

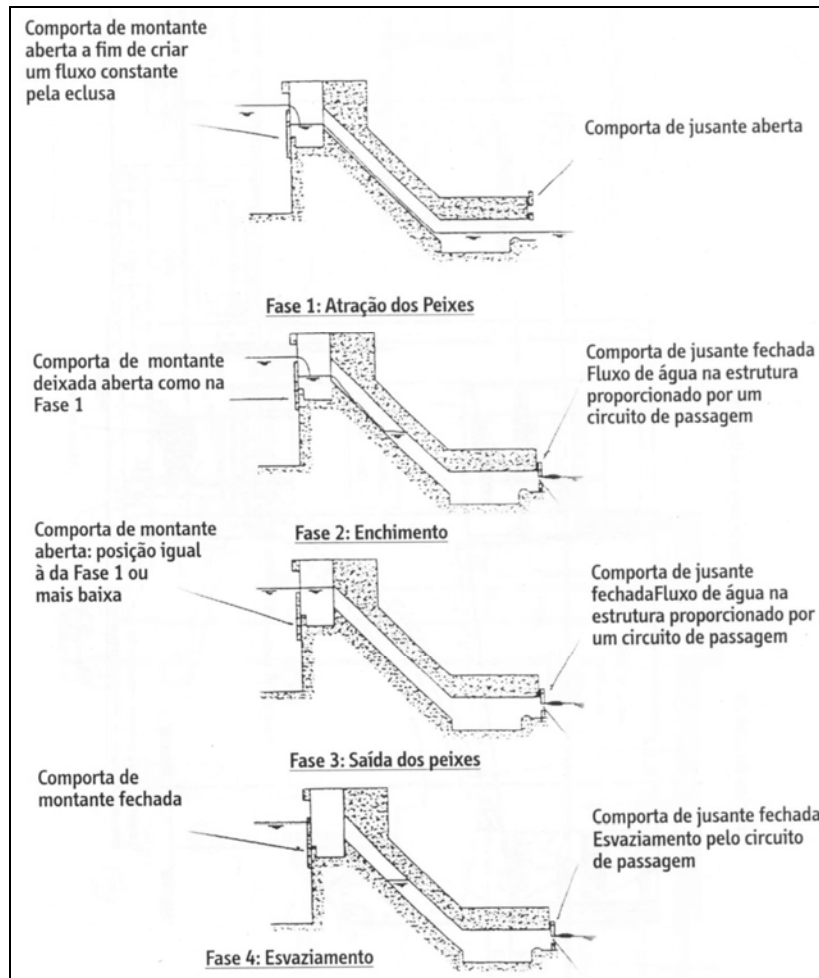


Figura 2.18 – Princípio de operação de uma eclusa para peixes. Fonte: CBDB (1999).

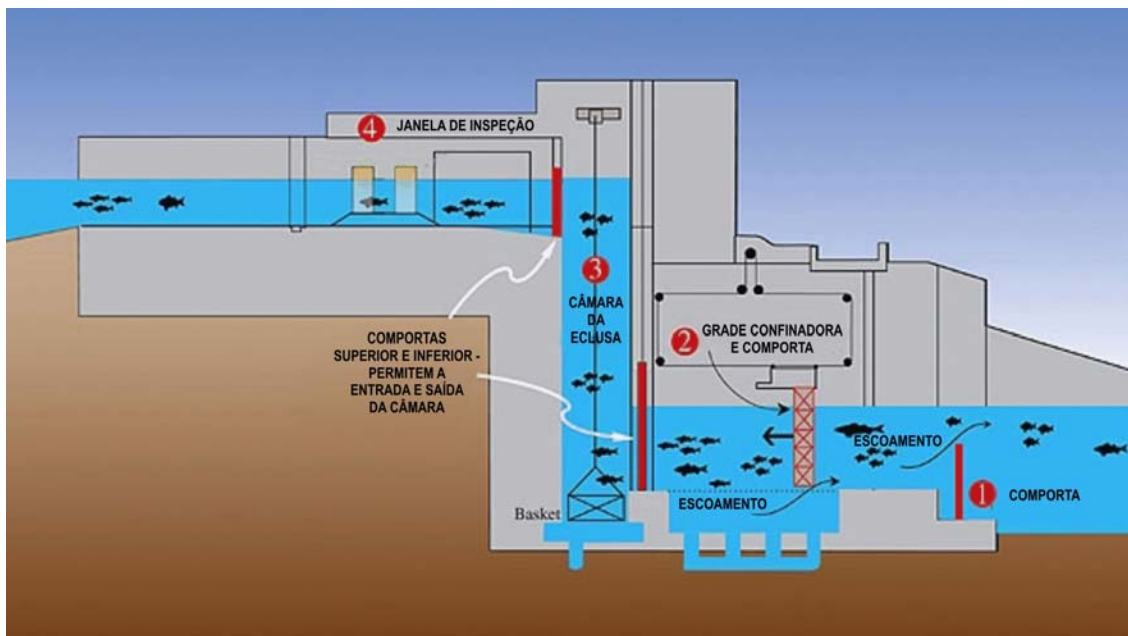


Figura 2.19 – Esquema da eclusa para peixes (construída na UHE St. Stephen, EUA).

Fonte: Adaptado de http://www.dnr.sc.gov/news/Yr2006/feb20/feb20_lift.html.

2.3.5 Elevadores para Peixes

Elevadores para peixes apresentam-se como uma boa solução em casos de quedas muito grandes. Para quedas de 20 a 30 metros ainda há a possibilidade da utilização de escadas para peixes. Para barragens com maiores quedas, os elevadores para peixes representam o mecanismo de transposição mais utilizado.

O elevador para peixes é constituído por uma câmara inferior na qual os peixes são induzidos a entrar, dessa câmara os peixes são descarregados em um poço, no fundo do qual existe um tanque que é utilizado para o transporte. Os peixes são atraídos para a piscina e após para o tanque por uma corrente condutora na piscina inferior. Essa piscina também pode ser equipada com uma grade para empurrar os peixes para dentro do tanque, que é levado até o nível de montante por um guincho. Os peixes são então levados por uma calha para a câmara superior, que possui uma série de comportas que criam uma corrente que guia os peixes para o reservatório (CBDB, 1999). A Figura 2.20 apresenta de forma esquemática o funcionamento de um elevador para peixes.

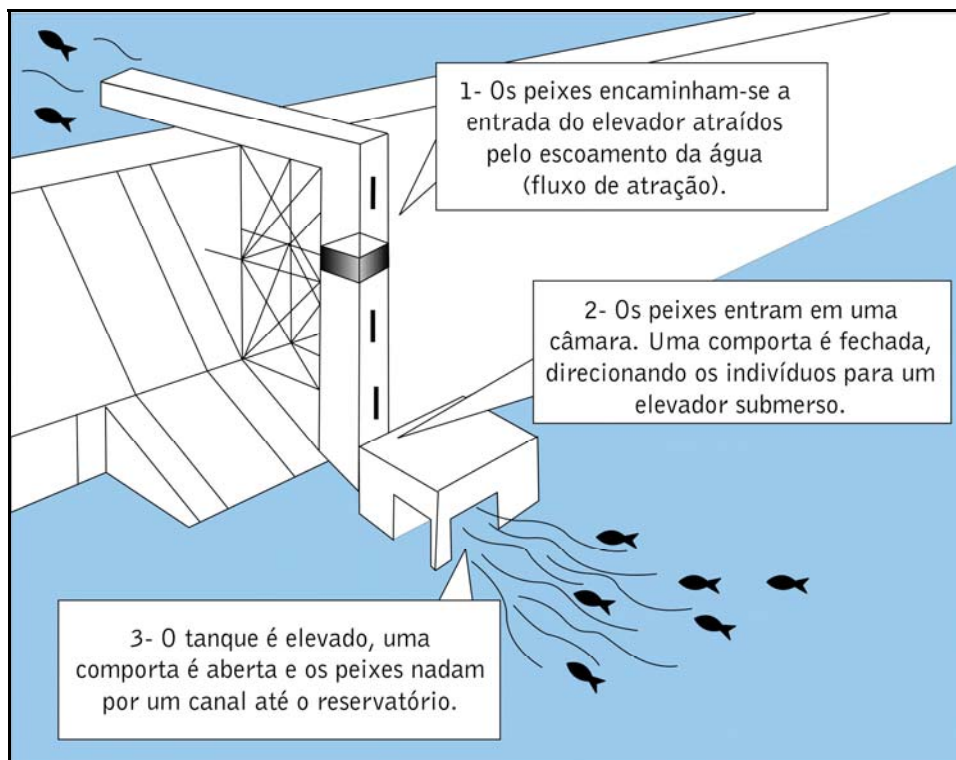


Figura 2.20 – Esquema do elevador de peixes. Fonte: Adaptado de Safe Habor Water Power Comporation (<http://www.shwpc.com/fishlift.html>, acesso 08/03/2007).

O tempo de transposição em elevadores para peixes pode ser em épocas migratórias, próximo de 15 minutos, ou seja, a transposição ocorre a uma velocidade bem maior se

comparada com o processo utilizando eclusas, onde o tempo de transferência de peixes é em torno de 1 a 2 horas (CBDB, 1999).

Esse mecanismo de transposição apresenta elevados custos operacionais devido aos dispositivos mecânicos necessários, que praticamente independem do tamanho da queda. Segundo Chiu *et al.* (2002), entre 1926 e 1928 foi construída a barragem Conowingo no Rio Susquehanna em Maryland (EUA). Por 34 anos teve uma potência instalada de 253.000 kW e em 1962, com novos geradores, passou a 512.000 kW. Por volta de 1970, quando as licenças tiveram que ser renovadas, exigiu-se que fossem tomadas medidas no sentido de restabelecer as populações de peixes migratórias no Rio de Susquehanna. Foi implantado um elevador experimental da barragem de Conowingo, além de outras ações, como o transporte de larvas e indivíduos adultos, a fim de beneficiar as populações de alosas (“*shad*”). Estes programas foram monitorados para determinar as soluções mais efetivas para a restauração e, em 1988 optou-se pela implantação de um elevador para peixes. O elevador para peixes foi completado em 1991 a um custo de 21 milhões de dólares. Em 2000, o monitoramento verificou a passagem pelo elevador para peixes mais de 163.000 alosas. Esse caso mostra mais uma vez a importância do monitoramento dos MTP para a adoção das alternativas mais eficientes.

No Brasil, tem-se conhecimento de dois MTP do tipo elevador: na UHE Sérgio Motta (Porto Primavera) e na UHE Funil. Na UHE Sérgio Motta (Porto Primavera), desde 1999, a transposição da ictiofauna é realizada através de um sistema de um tanque elevatório, vencendo um desnível de 29 m. A Figura 2.21 mostra algumas imagens dessa estrutura.

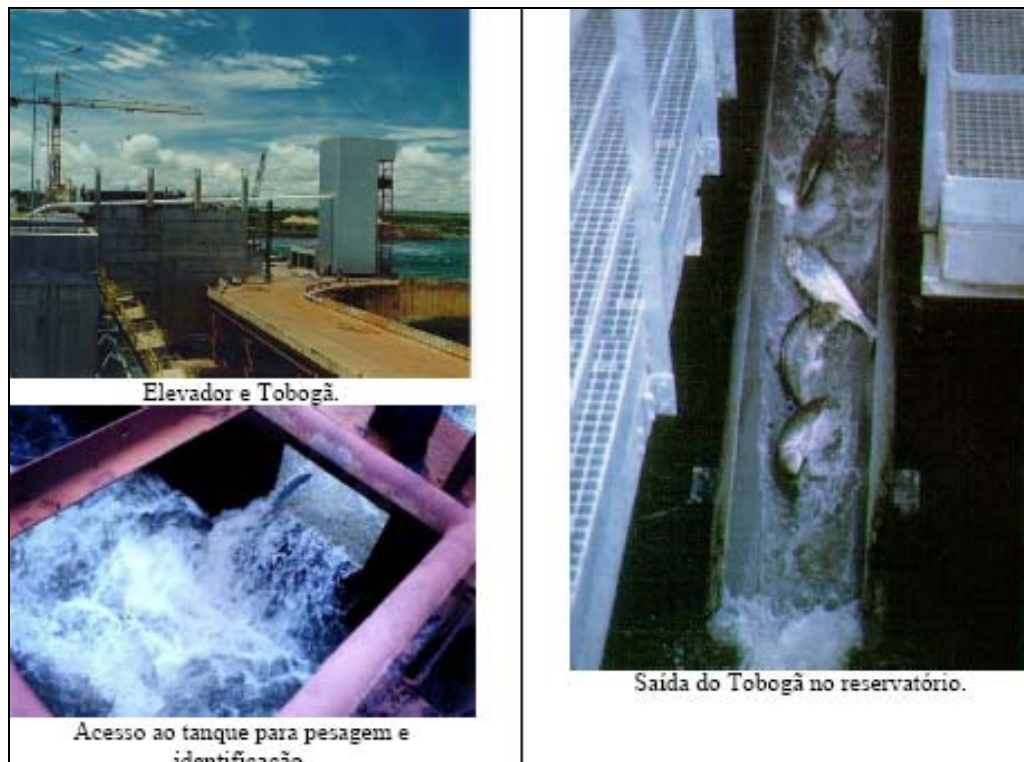


Figura 2.21 – Elevador da UHE Sérgio Motta (Porto Primavera). Fonte: Martins (2005).

Na UHE Funil foi instalado um elevador para peixes para vencer a altura de 50 m. A seguir apresenta-se um esquema da configuração geral dessa estrutura. A entrada é feita através de um canal com aproximadamente 2,40 x 26 m, que proporciona a atração dos peixes com a utilização de um sistema de água auxiliar. Os peixes atraídos por esse mecanismo aproximam-se e, através de uma queda d'água proporcionada por uma comporta instalada no interior do canal de entrada, adentram para o interior do sistema (UHE Funil). A caçamba do elevador apresenta capacidade para 8000 litros de água e é içada por um guincho com capacidade para 12 toneladas.

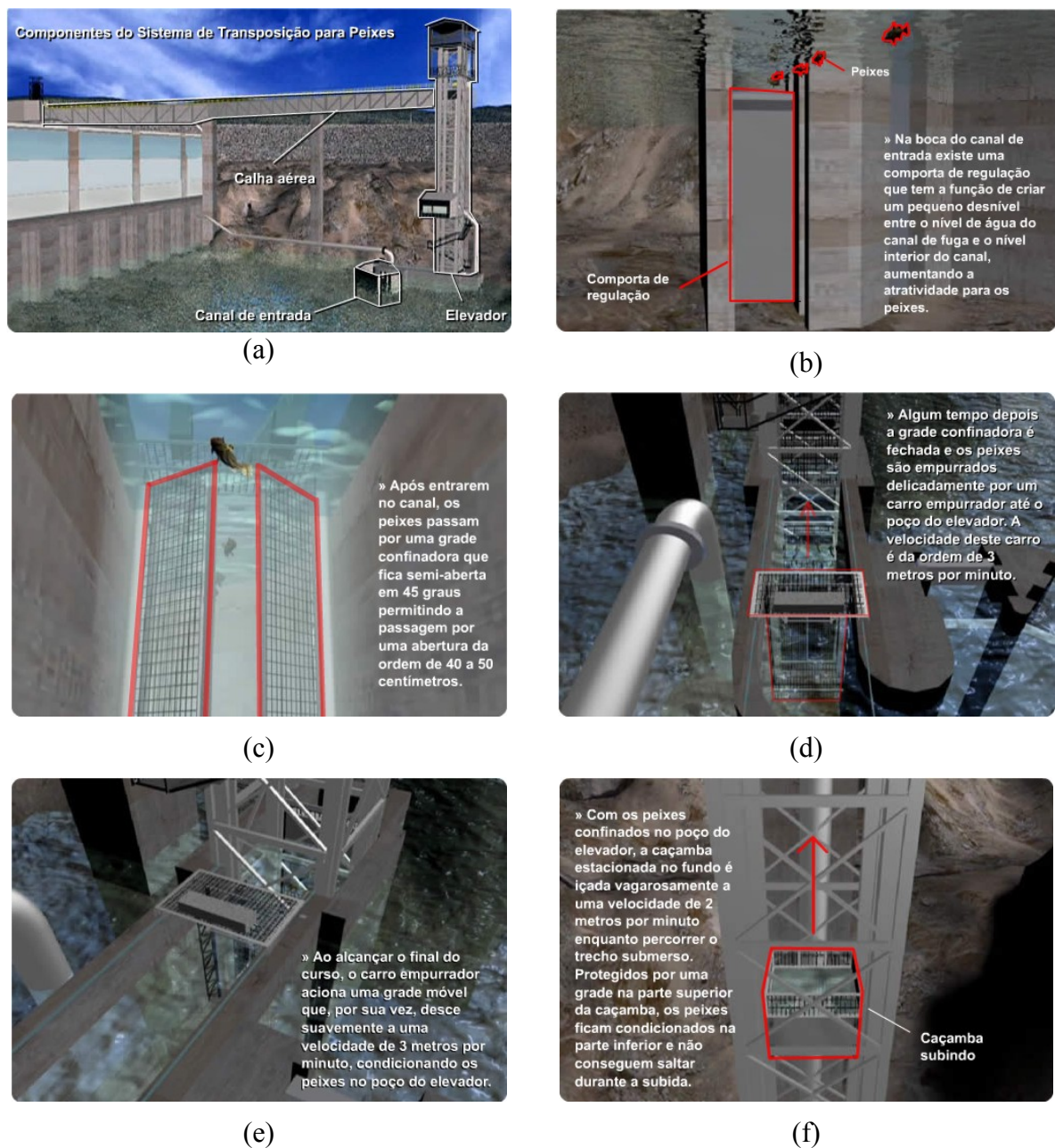


Figura 2.22 – Esquema do funcionamento do elevador para peixes da UHE Funil.

Fonte: Adaptado de www.ahefunil.com.br

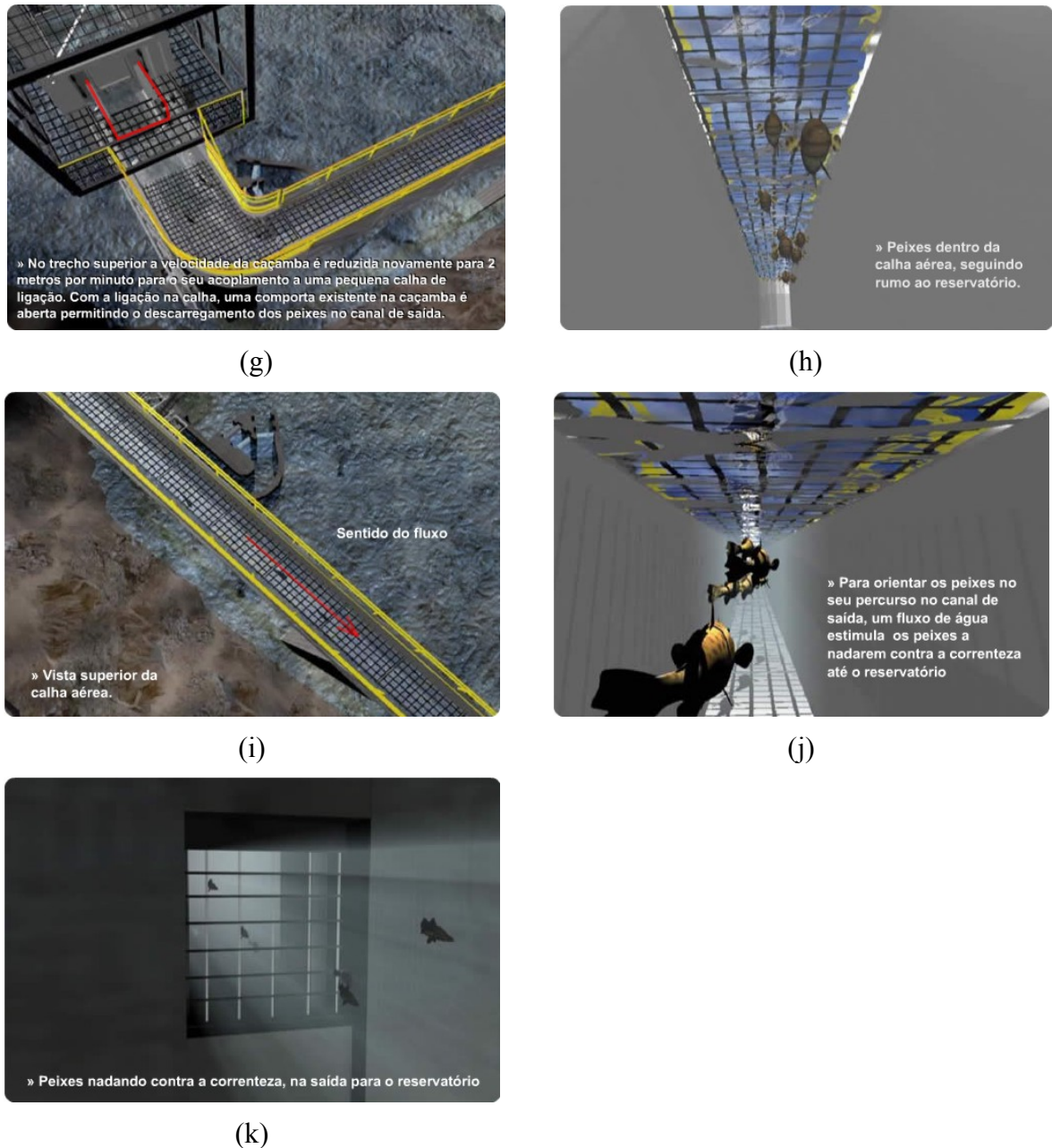


Figura 2.22 (continuação) – Esquema do funcionamento do elevador para peixes da UHE Funil.

2.3.6 Captura, Transporte e Soltura

A realização de transferência da ictiofauna através de estruturas que ligam a parte de montante a parte de jusante do barramento apresentam limitações quando se trata de grandes quedas e quando a variação do nível de água na barragem é significativa. Outra situação limitante ao uso de estruturas é o caso de barramentos em cascata ao longo de um rio, onde o peixe teria que transpor vários barramentos até chegar ao local propício para reprodução.

Nessas condições, a solução mais adequada é a coleta dos peixes no pé do barramento para encaminhamento até a parte de montante, soltando-os no reservatório junto

ao habitat adequado. Esse método é viável para as espécies que migram em grande número durante um período relativamente curto de tempo, sendo necessário cuidados especiais durante a captura e transporte evitando danos aos peixes (CBDB, 1999).

A Figura 2.23 apresenta uma espécie de sistema de captura e transporte de peixes, que consiste em um tanque flutuante capaz de se locomover na parte de jusante do barramento. Junto ao tanque há um fluxo de atração e quando o mesmo apresentar certa concentração de peixes, é içado e transportado até a parte de montante (Larinier, 2001).

A Figura 2.24 apresenta o esquema de um sistema de transposição do tipo elevador com caminhão-tanque. Em 2003 entrou em operação um mecanismo de transposição do tipo elevador com caminhão-tanque na UHE Santa Clara (Pompeu e Martinez, 2006). Até o momento este é o único MTP desse tipo no Brasil, no entanto, segundo Pompeu e Martinez (2005), só em Minas Gerais, estão indicados para pelo menos 10 barramentos em processo de licenciamento ou implementação nas bacias do rio Doce, Paraíba do Sul e Jequitinhonha.



Figura 2.23 – Mecanismo de transporte de peixes instalado no Rio Saint John, Barragem Mactaquac, no Canadá. Fonte: Larinier (2001).

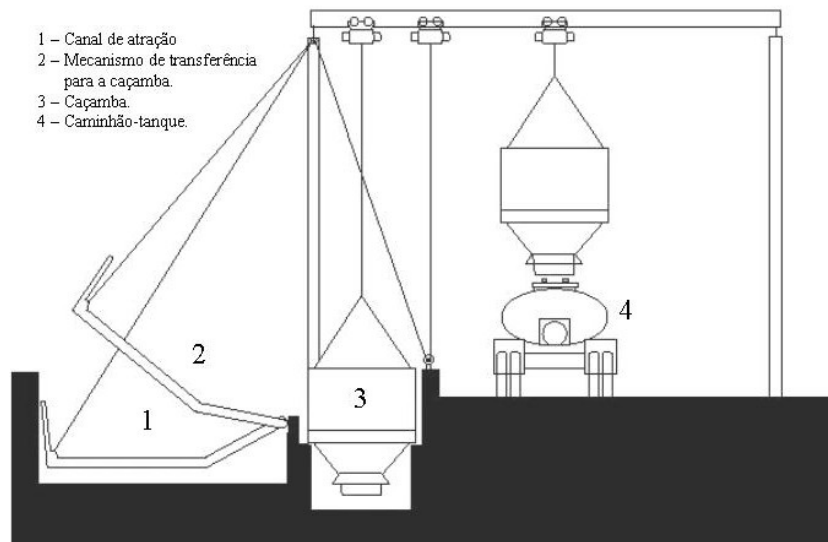


Figura 2.24 – Esquema de transposição utilizando elevador com caminhão-tanque.

Fonte: Pompeu e Martinez (2003).

Apesar dos extensivos trabalhos de operação desse tipo de mecanismo, verifica-se como uma boa alternativa principalmente em reservatórios com grandes variações de nível, em barramentos de altura elevada e, ainda pode ser útil, para limitar a transposição a determinadas espécies de peixes.

2.3.8 Passagens para Enguias

A enguia é uma espécie de peixe típica do hemisfério norte, caracterizando-se por uma capacidade natatória baixa, em geral não conseguindo nadar contra correntes de mais de 0,5 m/s (CBDB, 1999). No entanto, esta espécie apresenta a capacidade de rastejar. O MTP que melhor se adapta as enguias é baseado nas passagens tipo Denil, com os defletores substituídos por cerdas ou galhos, que auxiliam as enguias a arrastarem-se. Podem ser utilizados canais com até 40 % de declividade. A Figura 2.25 apresenta o esquema de funcionamento de uma passagem para enguias. A Figura 2.26 mostra alguns detalhes da escada para enguias construída na Alemanha.

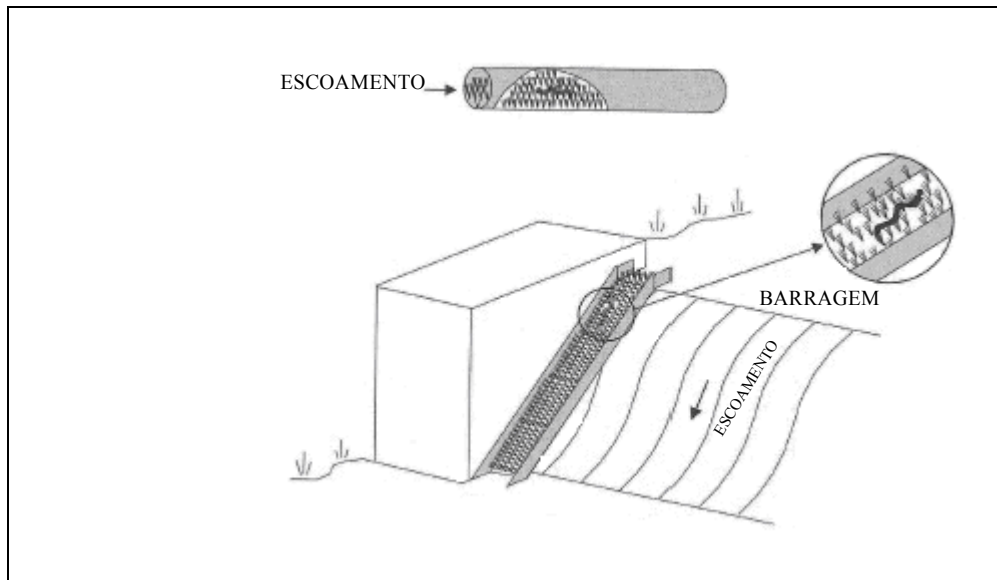


Figura 2.25 – Esquema de funcionamento de um mecanismo de transposição de enguias.

Fonte: Adaptado de Odeh (1999a).

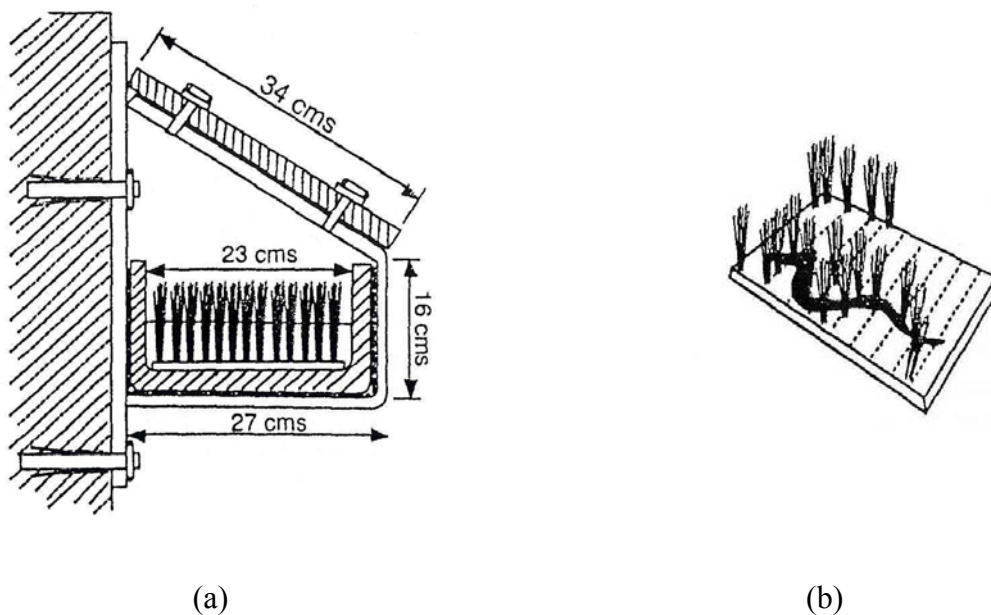


Figura 2.26 – Detalhes de uma escada para enguias: (a) seção transversal; (b) cerdas para auxiliar a subida das enguias. Fonte: Clay (1995).

2.4 Partes de uma Passagem para Peixes

Como neste trabalho estão sendo avaliados MTP do tipo escada para peixes, a seguir comentam-se algumas particularidades dessas estruturas, quanto as partes que as constituem.

As partes principais de uma escada para peixes são: a entrada da escada a jusante; a escada em si, que liga a parte de jusante a parte de montante e a saída do MTP a montante.

Outras estruturas também podem estar presentes em escadas para peixes, tais como: tanques de descanso ao longo da escada; sistema auxiliar de vazão na entrada da escada; sistema de monitoramento da estrutura, com tanques de controle, normalmente com visor e sistemas para contagem dos animais.

2.4.1 Entrada

O principal elemento para o sucesso da escada para peixes é o adequado fluxo de atração, que possibilita que o peixe encontre a entrada da estrutura. As entradas devem estar localizadas onde os peixes poderão ter o acesso facilmente; para isso, a percepção do fluxo de atração pelo peixe é essencial.

A determinação do local da entrada da escada para peixes depende do conhecimento das velocidades do escoamento a jusante da barragem (de acordo com a localização das estruturas da hidrelétrica, por exemplo), do regime hidrológico do rio e do caminho preferencial que o peixe escolhe para chegar até o barramento.

De acordo com Pavlov (1989), podem ser generalizadas algumas características do comportamento dos peixes na região de aproximação do barramento. Verifica-se que os peixes se aproximam dos locais de maior descarga d'água. Eles se concentram próximo ao barramento, à distâncias que variam entre 0 e 500 m, dependendo da velocidade do escoamento, sendo que quanto mais baixa a velocidade maior a aproximação. Pavlov (1989) percebeu que há a formação de regiões junto a barragem onde os peixes se movimentam em todas as direções, como uma zona de procura, e na presença de um determinado gradiente de corrente, selecionam regiões definidas. Quando entram em regiões de redemoinhos, perdem a orientação, podendo permanecer nessas regiões por muito tempo. Ao cansarem-se, reúnem-se em regiões de estagnação, como junto ao pé de vertedouros inoperantes.

De acordo com essas observações, verifica-se que uma condição necessária, mas não suficiente para a eficiência das escadas para peixes, é a capacidade de atração da estrutura para a sua entrada, para que então os peixes possam transpor o mecanismo com o menor gasto de energia.

O acesso para a escada para peixes deve evitar regiões de alta turbulência que podem desorientar o peixe. A Figura 2.27 apresenta alguns exemplos de posicionamento da entrada da escada em relação ao vertedouro. O esquema (a) está correto, pois a entrada localiza-se mais a jusante possível, junto ao barramento. O esquema (b) não é recomendado porque a entrada do MTP está muito distante do vertedouro, e o peixe pode ser atraído pelo fluxo do vertedouro e não da escada. O esquema (c) localiza a escada do lado errado, e os peixes se

concentrarão do outro lado, atraídos pelo fluxo vertente. O esquema (d) está correto, mas apresenta dificuldades de monitoramento e manutenção.

Nos casos de barramentos para aproveitamentos hidroenergéticos, geralmente os peixes são atraídos para as saídas das turbinas. Por isso, a entrada, nesses casos, deve estar posicionada perto da casa de força, mais próxima das margens do rio (Figura 2.28a, b). Em aproveitamentos com muitas turbinas, os peixes podem ser conduzidos por uma galeria posicionada acima da saída das turbinas (Figura 2.29). Em rios muito largos, pode ser necessário não só a utilização de mais de uma entrada, como a necessidade de mais de um MTP (Figura 2.28c). Segundo Larinier (2002b), as entradas da escada não devem estar posicionadas no centro do rio, nem muito a jusante do barramento (Figura 2.28d)

A profundidade do escoamento na entrada é um aspecto importante a ser considerado, que depende das condições a montante da escada. O posicionamento da entrada deve ser feito de forma que esta não fique exposta (muito elevada) e inacessível ao peixe. Algumas vezes, quando o escoamento é muito irregular, é necessário que existam várias entradas, a partir dos níveis de jusante.

Algumas vezes torna-se necessário a utilização de um fluxo auxiliar. O fluxo auxiliar fornece água para a porção final inferior da escada para peixes. Este fluxo auxiliar fornece uma corrente adicional de atração, principalmente nas épocas de maiores fluxos, onde o peixe poderia se encaminhar para outra região que apresentasse um fluxo de atração maior.

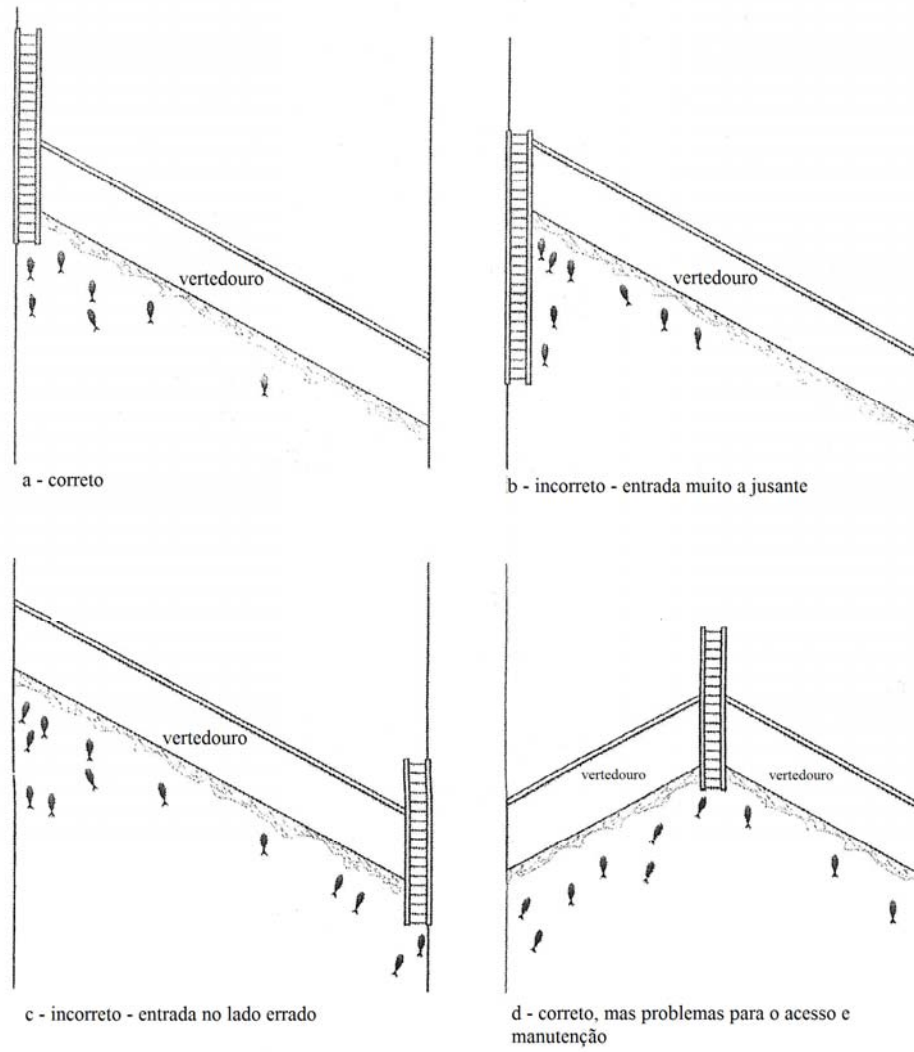


Figura 2.27 – Esquema de posicionamento de uma escada para peixes em relação ao vertedouro. Fonte: Adaptado de Larinier (2002b).

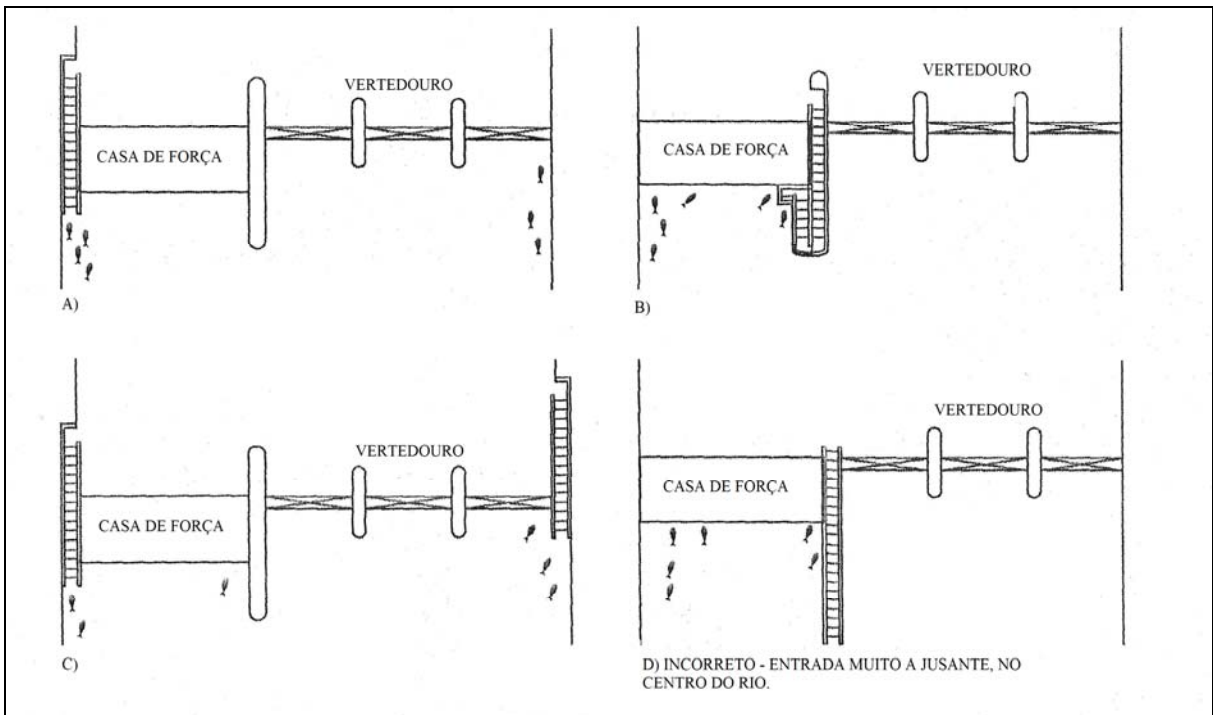


Figura 2.28 – Instalação de escadas para peixes em usinas hidrelétricas.

Fonte: Adaptado de Larinier (2002b).

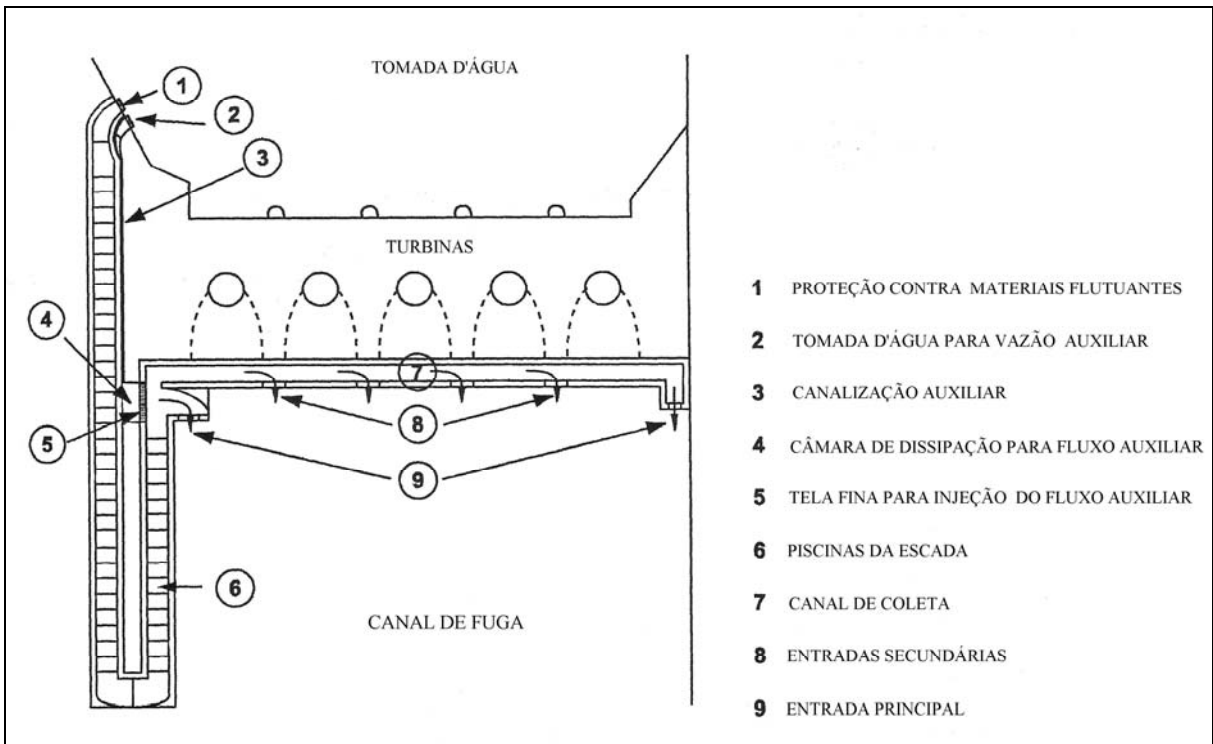


Figura 2.29 – Esquema de entradas múltiplas do tipo galeria situadas acima da saída das turbinas. Fonte: Adaptado de Larinier (2002b).

Bunt (2001) monitorou, desde 1994, duas escadas para peixes do tipo Denil no Grand River, Ontário. O autor apresenta, conforme a Figura 2.30, as modificações na entrada destas estruturas que tornaram o fluxo de atração mais eficiente, e, conseqüentemente, observou-se o aumento no número de peixes utilizando-as. Esses resultados indicam que a entrada das escadas para peixes devem ser localizadas o mais próximo da barragem ou vertedouro, desde que as velocidades no local não impeçam o acesso dos animais.

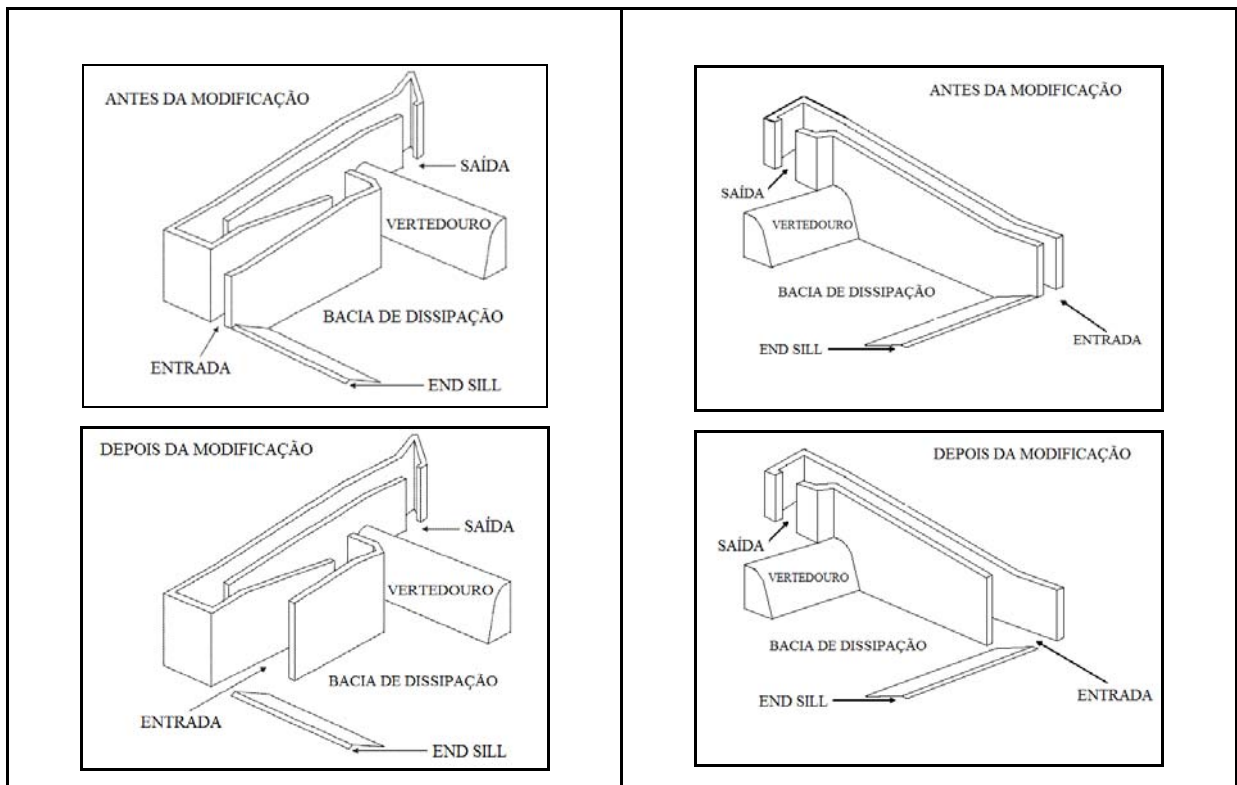


Figura 2.30 – Exemplos de modificações na entrada da escada para peixes, que tornaram as estruturas mais atrativas aos peixes. Fonte: Adaptado de Bunt (2001).

2.4.2 O Canal de Transposição

Um projeto apropriado de uma escada para peixes inclui a observação das características físicas do local, dados hidrológicos e biológicos. Vazões muito elevadas devido a mudanças a montante podem ser problemáticas e por isso devem existir mecanismos capazes de controlar as descargas. É necessário que se conheça o comportamento hidráulico na escada para peixes para a faixa de vazões a que esta estará submetida. Muitas vezes recorre-se a modelos físicos para melhor conhecimento dos padrões de escoamento.

Ao longo da escada para peixes devem ser previstos, se necessário, locais (tanques) de descanso ao longo da subida, para que o peixe consiga transpor o desnível total sem sofrer um desgaste excessivo.

A escada para peixes pode ter variações quanto a sua forma geral. Procura-se ligar a parte de jusante com a de montante da forma mais retilínea possível. Muitas vezes essa condição não é atendida devido ao nível que deve ser vencido. Nesses casos a escada pode apresentar trechos curvos ou com uma configuração mais compacta. A Figura 2.4 apresenta uma escada para peixes com um trecho curvo e outro “dobrado”.

2.4.3 Saída

A saída da escada para peixes deve ser planejada de modo que o peixe não se sinta desorientado e possa se adequar às novas condições em que se encontra. Para isso, devem-se conhecer as características de fluxo do local da saída do MTP. Recomenda-se que estas sejam posicionadas em locais onde exista um fluxo para jusante consistente, mas longe de vertedouros ou casas de força. Normalmente, durante a migração para montante, os peixes tendem a seguir contra a correnteza e contornando as margens do rio. A saída pode ser prolongada para montante até a posição onde se observe condições favoráveis.

Em situações em que os níveis de montante sofrem variações durante sua operação, há a necessidade da previsão da implantação de várias saídas. A Figura 2.31 mostra o exemplo na saída da escada para peixes da barragem Manoel Alves, em Tocantins, onde foram instaladas 3 saídas para o MTP, com o objetivo de possibilitar a utilização da estrutura para diferentes níveis de montante.

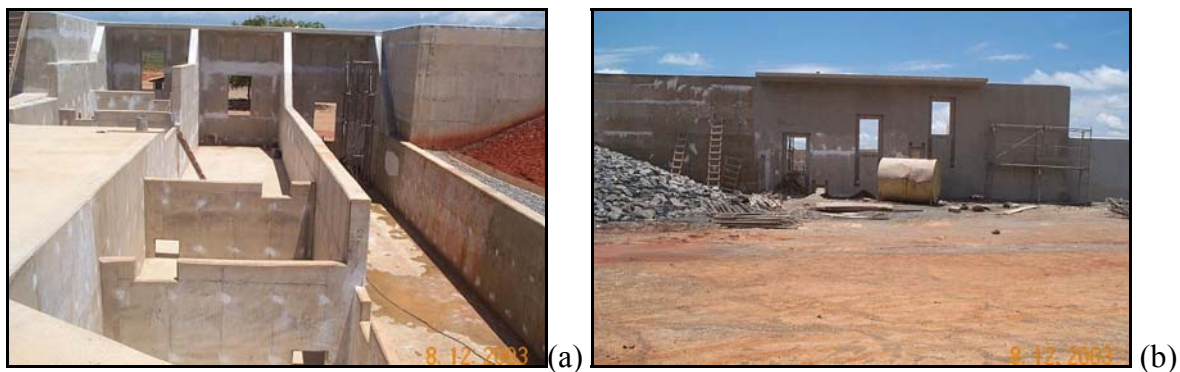


Figura 2.31 – Saída múltipla da escada para peixes da barragem Manoel Alves/TO (a) vista de jusante para montante da escada para peixe; (b) vista de montante para jusante.

Fonte: Cortesia da Magna Engenharia Ltda.

2.5 A Passagem de Montante para Jusante

A maioria das pesquisas sobre MTP estão relacionadas com a trajetória de jusante para montante durante o processo reprodutivo. No entanto, o retorno dos indivíduos juvenis

ou adultos é fundamental, na maioria dos casos, para a eficiência do MTP a longo prazo. Segundo Larinier e Travade (2002), passagens para peixes para a transposição no sentido montante-jusante apresentam um alto grau de complexidades, sendo que até o momento não há um mecanismo satisfatório. Segundo esses autores, a instalação de uma barragem em locais onde há espécies que migram de montante para jusante causam muitos problemas, entre eles:

- demora ou impedimento da migração;
- danos aos peixes pela passagem por vertedouros ou turbinas;
- mortalidade como resultado de predadores, como peixes e pássaros no reservatório e na saída da turbina;
- mortalidade devido a mudanças na qualidade da água, como falta de oxigênio, supersaturação por gases atmosféricos no escoamento de vertedouros e turbinas.

Para evitar os danos causados ao peixe ao passar por vertedouros, podem ser instaladas barreiras, físicas ou elétricas, para inibir a utilização deste caminho.

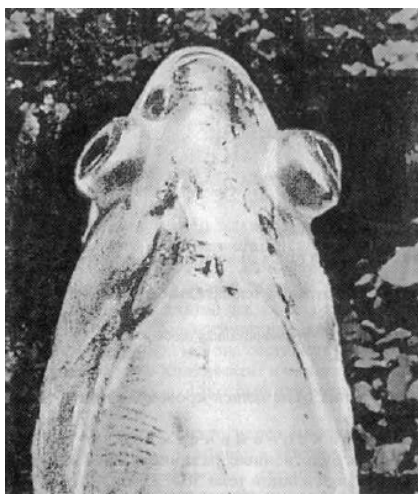
Da mesma maneira que no caso de vertedouros, se a passagem pelas turbinas causar altas taxas de mortalidade dos peixes, deve-se impedir que estes entrem nas turbinas, encaminhando-os, através de alguma estrutura, por outro caminho para a descida do rio. Uma das maneiras mais eficientes é a colocação de uma tela inclinada na entrada da turbina direcionando os peixes para um desvio que os leve até a parte de jusante.

A mortalidade de peixes que passam por turbinas depende da espécie do peixe, do tamanho e do tipo de turbina. As principais causas da morte de peixes ao passarem por turbinas devem-se às bruscas acelerações e desacelerações da corrente, à curvatura dos filamentos líquidos, a forte queda de pressão (cavitação) e aos obstáculos existentes (grades da tomada d'água, palhetas direcionais, pás do rotor). Altas quedas de pressão (maiores que 5 - 6 m) causam a ruptura da bexiga natatória dos peixes e produzem embolia gasosa. A Figura 2.32 apresenta alguns exemplos de danos causados a peixes ao passarem por turbinas hidráulicas.

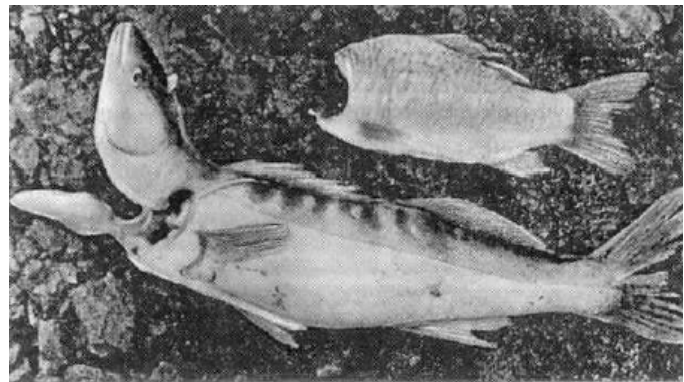
As turbinas Pelton apresentam uma taxa de mortalidade de peixes de 100%. As turbinas Francis e Kaplan são mais “amigáveis”, sendo que a mortalidade aumenta com a altura de queda, a velocidade de rotação do rotor, o comprimento do peixe e a redução do coeficiente de cavitação. Na Tabela 2.3 são apresentados alguns resultados obtidos em estudos da avaliação da taxa de mortalidade de peixes submetidos a diferentes turbinas em alguns locais.

Pode-se dizer que a maioria dos estudos relacionados à migração de montante para jusante relacionam-se ao projeto de turbinas hidráulicas “amigáveis”. A garantia da

sobrevivência à passagem pelas turbinas está relacionada ao tamanho e ângulo das aberturas, a velocidade de rotação da turbina, a forma do rotor, entre outros. O Departamento de Energia dos Estados Unidos tem demonstrado interesse no desenvolvimento de turbinas menos agressivas aos peixes e ao mesmo tempo sem perdas na eficiência da mesma desde meados dos anos 1990. Entre os trabalhos desenvolvidos nesse programa, pode-se citar Cada *et al.* (1997), Odeh (1999b), Cada (2001) e DOE (2001). Alguns fabricantes de turbinas também têm demonstrado interesse no desenvolvimento de turbinas menos agressivas aos peixes. Loiseau *et al.* (2006) apresentam os estudos que vem sendo conduzidos pela Alstom e pelo U. S. Corps of Engineers nesta linha.



(a)



(b)

Figura 2.32 – Danos causados a peixes que passam por turbinas: (a) olhos inchados; (b) corpos dilacerados. Fonte: Pavlov *et al.* (2002).

Tabela 2.3 — Alguns resultados da mortalidade de peixes que passam por turbinas (Fonte: CBDB, 1999).

| Tipo de turbina | Velocidade de rotação (rpm) | Queda (m) | Diâmetro do rotor (m) | Mortalidade (%) | Observação |
|-----------------|-----------------------------|-----------|-----------------------|-----------------|---|
| Francis | 55 | 5 | | 5,4 | Estudos realizados na França com trutas de 10 a 20 cm |
| Kaplan | 166 | 11,5 | | 13 | |
| Francis | 428 | 61,5 | | 41 – 67 | |
| Francis | 90 | 13,1 | 2,54 | 0 – 83,6 | Estudo americano em peixes jovens e adultos de várias espécies de comprimento variando entre 5 e 30 cm. |
| Francis | 150 | 11,9 | 1,52 | 6,4 – 63,6 | |
| Francis | 150 | 10,9 | 1,40 | 4,5 – 35,5 | |
| Francis | 163,6 | 30,5 | 2,12 | 4 – 46,3 | |

Quando são instaladas escadas para peixes por bacias sucessivas ou passagens Denil para a transposição de jusante para montante, essas mesmas estruturas podem ser utilizadas por algumas espécies de peixes para descer o rio. Acredita-se que o sucesso desta operação esteja fortemente relacionado ao posicionamento da saída do canal no reservatório e com a facilidade das espécies de encontrá-las. Da mesma maneira que são colocadas grades para evitar a passagem pelo vertedouro ou turbinas, podem ser avaliadas possibilidades de imposição de determinados percursos através de barreiras físicas. Para reservatórios menores, possivelmente essas alternativas sejam factíveis, no entanto, ao serem avaliados sistemas de maiores dimensões, essas tarefas tornam-se mais complexas.

Outra alternativa para que o peixe consiga migrar rio abaixo consiste na construção de um canal especial, na superfície do reservatório, que os conduza para um desvio. Esse tipo de solução requer uma corrente de atração. Normalmente apresenta-se problemática na operação e limpeza.

2.6 Modelagem Física de Escadas para Peixes

2.6.1 Semelhança, Análise Dimensional e Modelos Físicos

O escoamento em algumas estruturas hidráulicas apresenta-se bem conhecido. No entanto, na maioria dos problemas da mecânica dos fluidos, onde o escoamento é complexo, faz-se necessário recorrer a estudos experimentais para melhor entender os fenômenos envolvidos.

Inicialmente procura-se entender determinado fenômeno relacionando as variáveis físicas, através do conhecimento teórico. Quando um escoamento é analisado pelo processo teórico, primeiramente procuram-se obter as equações diferenciais resultantes da aplicação dos princípios físicos fundamentais, relativos aos transportes de massa, quantidade de movimento e energia (Munson *et al.*, 2004). No entanto, na maioria das situações, encontram-se dificuldades matemáticas na resolução dessas equações. Procura-se contornar essas dificuldades através da introdução de hipóteses simplificadoras que conduzam a equações que tenham resoluções matemáticas (Munson *et al.*, 2004).

O uso de modelos físicos procura alcançar resultados que possam descrever o comportamento de uma estrutura similar real. Para isso é necessário que se obedeçam a leis de semelhança, onde pode ser estabelecida a relação existente entre o modelo físico e outro sistema (protótipo).

Através do uso de modelos físicos, pode-se estudar o fenômeno que estamos interessados sob condições experimentais cuidadosamente controladas. Geralmente a

quantidade de resultados experimentais obtidos é muito grande, e se torna útil que estes sejam apresentados utilizando recursos obtidos na análise dimensional.

A análise dimensional é um método para se reduzir o número e a complexidade das variáveis que afetam um dado fenômeno físico (White, 2004). A adimensionalização é um processo matemático que permite agrupar, condensar e homogeneizar os resultados experimentais, sendo uma de suas principais vantagens a redução do número de variáveis que controlam um fenômeno, simplificando sua análise (Pena, 2004).

O teorema central da análise dimensional é o teorema de Buckingham. Este enuncia que se um fenômeno físico depende de n variáveis dimensionais, que podem ser expressas em função de r variáveis fundamentais (ou básicas ou primárias), então as n variáveis podem ser agrupadas em $n-r$ grupos adimensionais independentes.

Pode-se formar uma infinidade de grupos adimensionais, mas só se pode encontrar um número fixo de grupos independentes. Pena (2004) exemplificou isto através da demonstração da aplicação do teorema de Buckingham a equação geral da hidráulica. A partir disso, pode-se chegar aos números adimensionais mais conhecidos na hidráulica. Para isso, considera-se que a expressão para um problema hidráulico geral é:

$$F(a, b, c, d, V, \rho, g, \mu, p, \sigma, E) = 0 \quad (2.20)$$

Tem-se a partir de 11 variáveis dimensionais ($n=11$), que podem ser expressas em função das 3 magnitudes fundamentais ($r=3$): [M], [L], [T] (Tabela 2.4), podendo chegar a 8 ($n-r = 8$) grupos adimensionais, conforme apresentado na Equação (2.21).

Tabela 2.4 – Equações dimensionais das variáveis consideradas na equação geral da hidráulica.

| Variável | | Equação adimensional |
|------------|-------------------------|-------------------------------------|
| a, b, c, d | Variáveis geométricas | [M] |
| V | Velocidade | [LT ⁻¹] |
| ρ | Densidade | [ML ⁻³] |
| g | Aceleração da gravidade | [LT ⁻²] |
| μ | Viscosidade dinâmica | [ML ⁻¹ T ⁻¹] |
| p | Pressão | [ML ⁻¹ T ⁻²] |
| σ | Tensão superficial | [MT ⁻²] |
| E | Módulo de elasticidade | [ML ⁻¹ T ⁻²] |

$$\phi\left(\frac{b}{a}; \frac{c}{a}; \frac{d}{a}; Fr; Re; Eu; We; Ca\right) = 0 \quad (2.21)$$

Os três primeiros números adimensionais relacionam as dimensões geométricas e os demais são números adimensionais usuais na hidráulica. Cada um desses números adimensionais possui um significado físico e pode, em geral, ser interpretado como uma relação de forças. A Tabela 2.5 apresenta alguns dos grupos adimensionais mais utilizados em mecânica dos fluidos.

A semelhança, de maneira geral, indica que existe uma relação conhecida entre dois fenômenos. Em mecânica dos fluidos, normalmente é a relação entre o escoamento em escala natural e o escoamento em estruturas, normalmente menor, mas geometricamente similar. A semelhança dinâmica estabelece relações entre as variáveis envolvidas no protótipo e no modelo físico reduzido. Para que exista a semelhança dinâmica entre escoamentos em protótipo e em modelo, é necessário, primeiramente, que exista semelhança geométrica e semelhança cinemática.

Tabela 2.5 –Alguns grupos adimensionais e variáveis utilizadas na mecânica dos fluidos (Munson *et al.* 2004).

| Grupo adimensional | Nome | Interpretação | Tipo de aplicação |
|---|--------------------|--|--|
| $Re = \frac{\rho \cdot V \cdot l}{\mu}$ | Número de Reynolds | Força de inércia / força viscosa | É importante na maioria dos problemas de mecânica dos fluidos. |
| $Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot l}}$ | Número de Froude | Força de inércia / força gravitacional | Escoamentos com superfície livre. |
| $Eu = \frac{p}{\rho \cdot V^2}$ | Número de Euler | Força de pressão / força de inércia | Problemas onde a pressão, ou diferenças de pressão, são importantes. |
| $Ca = \frac{\rho \cdot V^2}{E_v}$ | Número de Cauchy | Força de inércia / força de compressibilidade | Escoamentos onde a compressibilidade do fluido é importante. |
| $Ma = \frac{V}{c}$ | Número de Mach | Força de inércia / força de compressibilidade | Escoamentos onde a compressibilidade do fluido é importante. |
| $St = \frac{\omega \cdot l}{V}$ | Número de Strouhal | Força de inércia (local) / força de inércia (convectiva) | Escoamentos transitórios com uma frequência característica de oscilação. |
| $We = \frac{\rho V^2 l}{\sigma}$ | Número de Weber | Força de inércia / força de tensão superficial | Problemas onde o efeito da tensão superficial é importante. |

Para que se verifique semelhança geométrica, é necessário que se mantenha uma proporção constante entre todas as dimensões geométricas de protótipo e modelo, e que as dimensões angulares permaneçam inalteradas. A semelhança cinemática se caracteriza pelo comportamento similar das linhas de corrente do escoamento em modelo e em protótipo.

O uso dos números adimensionais também pode auxiliar na definição da semelhança dinâmica entre escoamentos em protótipo e em modelo, já que esses números devem permanecer constantes para fluxos geometricamente similares. No entanto, a semelhança dinâmica total em ensaios em modelos não pode ser obtida, já que é impossível igualar-se simultaneamente todos os números adimensionais (com exceção de modelos na escala 1:1). Então se procura, para cada situação, avaliar as forças mais importantes no escoamento para definir qual será o tipo de modelo e, conseqüentemente, quais efeitos dinâmicos devem ser reproduzidos.

Devido aos complexos padrões de escoamento presentes em estruturas do tipo escada para peixes, muitas vezes se utilizam modelos físicos para o melhor entendimento das características hidráulicas. Nos escoamentos com superfície livre, como é o caso das escadas para peixes, considera-se que as forças que regem o movimento são as forças de inércia e as forças de gravidade, que podem ser representadas pelo número de Froude. A interpretação física do número de Froude é que ele representa uma medida ou índice das importâncias relativas das forças de inércia que atuam na partícula fluida e o peso da partícula. É importante ressaltar que o número de Froude não é igual a razão entre as forças, mas indica algum tipo de medida da influência média desses dois esforços. O número de Froude é importante nos problemas onde a gravidade (ou peso) é significativa. Assim, em modelos de escada para peixes utilizam-se os critérios de semelhança de Froude que permitem transpor os resultados obtidos em modelos para a estrutura real (protótipo), a partir das relações a seguir:

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda \quad (2.22)$$

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\lambda} \quad (2.23)$$

$$\frac{Q_p}{Q_m} = (\lambda)^{5/2} \quad (2.24)$$

$$\frac{q_p}{q_m} = (\lambda)^{3/2} \quad (2.25)$$

$$\frac{p_p}{p_m} = \lambda \quad (2.26)$$

onde: λ é a relação entre a dimensão do protótipo e a dimensão do modelo, os índices p e m , indicam, respectivamente, valores em protótipo e em modelo, l é o comprimento, V é a velocidade, Q é a vazão, q é a vazão específica e p é a pressão.

A escolha da escala de redução considera limitações físicas do laboratório e questões econômicas. Clay (1995), comenta que, como as escadas para peixes são relativamente de pequenas dimensões (comparando-se com outras estruturas hidráulicas), regularmente são utilizados modelos grandes, sem necessidade de recorrer a modelos distorcidos.

Pena (2004) realizou uma análise dimensional para escadas para peixes do tipo ranhura vertical. Esse autor estudou escadas para peixes com a ranhura vertical livre em toda altura da parede e escadas com a ranhura obstruída a partir do fundo por um obstáculo de altura z (Figura 2.38). Primeiramente uma análise dimensional exige que sejam listados todos os parâmetros que possam ter influência no problema estudado, o que requer uma análise qualitativa baseada em observações e pesquisas experimentais.

Pena (2004) considerou que a hidrodinâmica nas escadas para peixes de ranhura vertical depende de seis variáveis: a vazão (Q), a declividade do canal (S), a largura da ranhura (b_0), a profundidade característica do fluxo (h_m), a aceleração da gravidade (g) e a densidade da água (ρ). Para o caso com ranhuras preenchidas na base, tem-se mais uma variável a ser considerada: a altura deste obstáculo (z). Essas sete variáveis podem ser expressas em função das variáveis fundamentais da seguinte forma:

| Variável | Equação adimensional |
|---------------|----------------------|
| Q | $[L^3T^{-1}]$ |
| S | adimensional |
| $b_0; h_m; z$ | $[L]$ |
| g | $[LT^{-2}]$ |
| ρ | $[ML^{-3}]$ |

Utilizando o teorema de Buckingham, Pena (2004) obteve os seguintes números adimensionais para escadas para peixes do tipo ranhura vertical:

$$\pi_1 = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot b^5}} \quad (2.27)$$

$$\pi_2 = S \quad (2.28)$$

$$\pi_3 = \frac{y}{b} \quad (2.29)$$

$$\pi_4 = \frac{z}{b} \quad (2.30)$$

O número adimensional π_1 relaciona as forças de inércia com a força gravitacional, sendo uma variação do número de Froude. Puertas *et al.* (2004) e Pena (2004) consideram

esse adimensional como vazão adimensional (Q^A). Os demais números representam relações geométricas da estrutura.

2.6.2 Estudos em Modelos Reduzidos

Neste item procura-se comentar sobre alguns dos estudos experimentais realizados em escadas para peixes do tipo ranhura vertical, sintetizando os principais resultados encontrados na literatura.

Rajaratnam *et al.* (1986) estudaram sete geometrias de escadas para peixes do tipo ranhura vertical (Figura 2.34, desenhos 1 a 7), em diferentes escalas (1:5,33; 1:8 e 1:16). Essas geometrias representavam escadas para peixes com tanques de 3,05 m de comprimento, 2,44 m de largura e ranhura com abertura de 0,305 m. Rajaratnam *et al.* (1992) estudaram outras geometrias de MTP do tipo ranhura vertical, apresentados na Figura 2.34 (geometrias 8 a 18). Na Tabela 2.6 apresenta-se um resumo dos modelos utilizados por Rajaratnam *et al.* (1986) e Rajaratnam *et al.* (1992).

Rajaratnam *et al.* (1986) e Rajaratnam *et al.* (1992) verificaram que o escoamento nos tanques é tridimensional para as estruturas ensaiadas. A Figura 2.34 apresenta o padrão principal da circulação de água nos tanques para as diferentes geometrias, sendo que se verificaram variações destas trajetórias ao longo da profundidade. Um exemplo disso pode ser verificado no padrão de escoamento do modelo do desenho 7, onde as linhas de fluxo apresentam comportamentos diferentes na parte superior e na parte inferior do tanque (linha cheia e linha tracejada, respectivamente).

Wu *et al.* (1999) realizaram ensaios em um modelo de uma escada para peixes do tipo ranhura vertical com a geometria apresentada na Figura 2.33. O modelo apresentava sete tanques e escala de transposição igual a 1:2,67 (considerando um protótipo com $b_0 = 0,305$ m, $L = 10b_0$ e $B = 8b_0$). Foram testadas três declividades de escadas para peixes: 5, 10 e 20%.

Wu *et al.* (1999) encontraram para os modelos com canal de declividade 5% um padrão de escoamento bidimensional, e para modelos com declividade de 10 e 20%, características principais tridimensionais.

Tabela 2.6 – Resumo das características dos modelos utilizados por Rajaratnam *et al.* (1986) e Rajaratnam *et al.* (1992).

| Desenho | Escala | Declividade | Nº de tanques |
|---------|--------|-----------------------|-------------------|
| 1 | 1:5,33 | 10% | 4 |
| 2 | 1:5,33 | 10% | 4 |
| 3 | 1:5,33 | 10% | 4 |
| 3 | 1:8 | 5,6% | 9 |
| 3 | 1:8 | 10% | 9 |
| 3 | 1:16 | 5,1%-6,9%-10% - 15,2% | 18 - 18 - 10 - 18 |
| 4 | 1:8 | 5,6% e 10% | 9 e 9 |
| 5 | 1:8 | 5,7% e 10% | 9 e 9 |
| 6 | 1:8 | 5,7% e 10% | 9 e 9 |
| 7 | 1:16 | 5,4% e 10% | 10 e 10 |
| 8 | 1:8 | 10% e 14,9% | 18 e 18 |
| 9 | 1:8 | 10% e 14,9% | 18 e 18 |
| 10 | 1:8 | 5% - 10% - 14,6% | 18 - 18 - 18 |
| 11 | 1:8 | 5% - 10% - 14,9% | 7 - 7 - 7 |
| 12 | 1:8 | 10% e 14,6% | 7 e 7 |
| 13 | 1:8 | 5% - 9,9% - 7,4% | 6 - 6 - 6 |
| 14 | 1:8 | 5% - 10% - 14,8% | 10 - 10 - 10 |
| 15 | 1:8 | 5% - 10,1% - 14,9% | 10 - 10 - 10 |
| 16 | 1:8 | 5% - 10% - 15% | 5 - 5 - 5 |
| 17 | 1:8 | 10% e 15% | 4 e 4 |
| 18 | 1:8 | 15% | 8 |

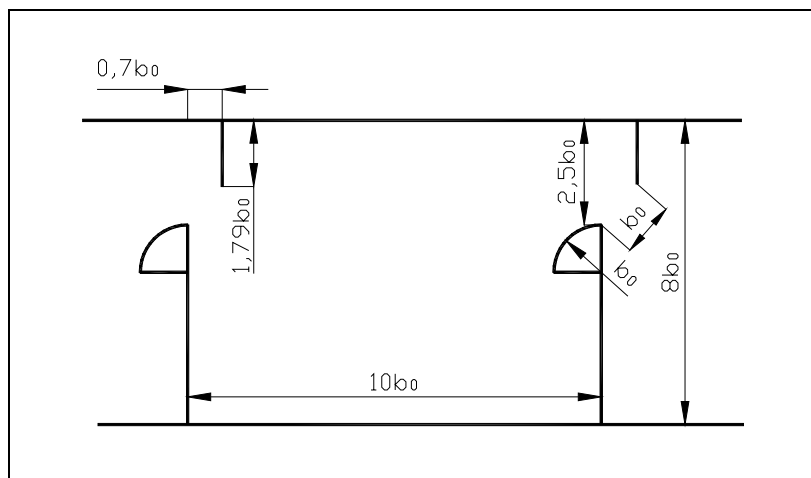


Figura 2.33 – Geometria da escada para peixes estudada por Wu *et al.* (1999).

Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (1999).

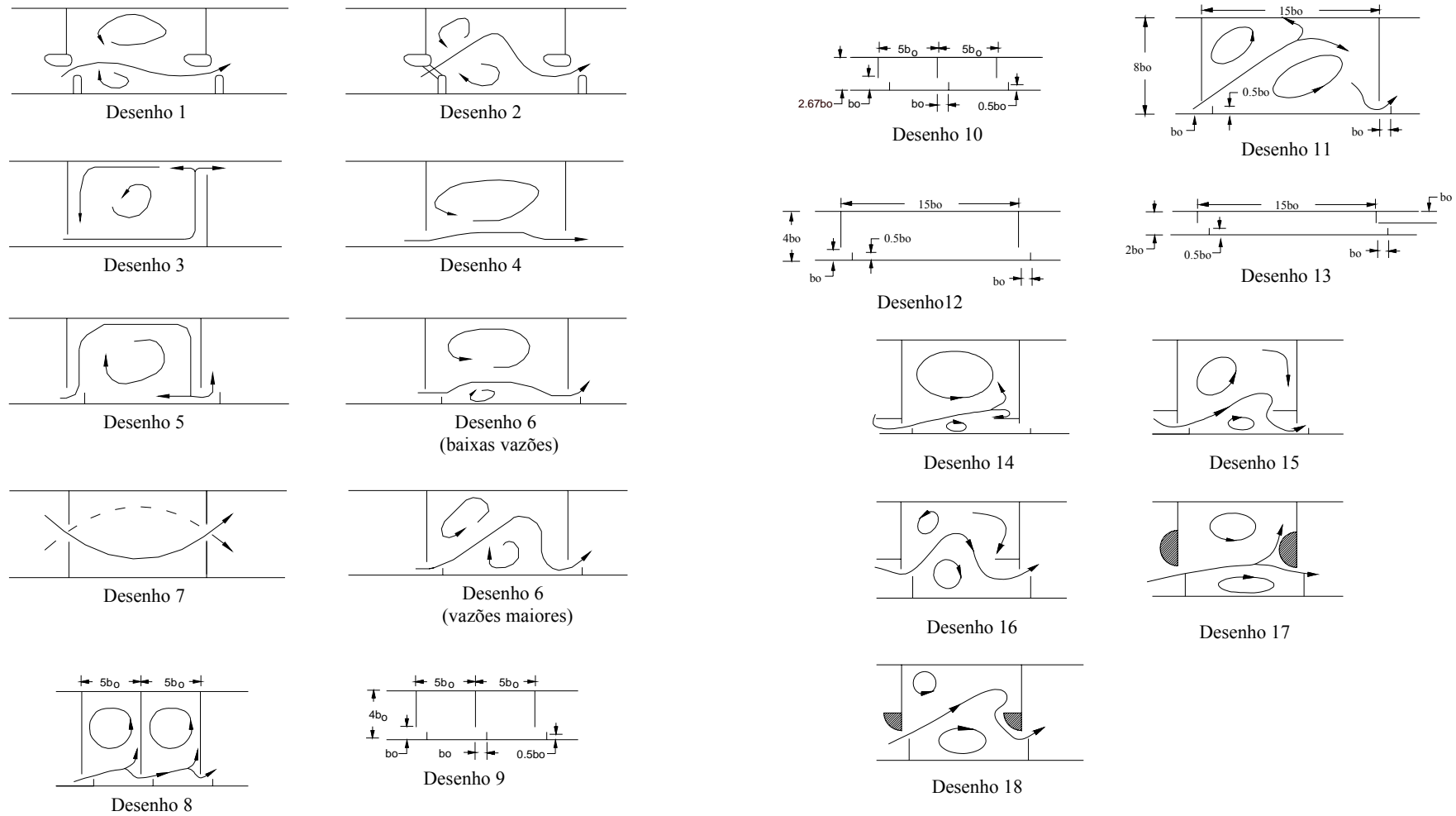


Figura 2.34 – Geometria dos modelos estudados por Rajaratnam *et al.*(1986) e respectivos padrões gerais do escoamento. Fonte: Rajaratnam *et al.* (1986) e Rajaratnam *et al.* (1992)

O padrão do escoamento nas ranhuras e no tanque foi observado através da injeção de corante no escoamento. Wu *et al.* (1999) consideraram que o padrão do escoamento e os valores de Δh mantêm-se constantes ao longo de todos os tanques. As medições de profundidade e velocidade foram realizadas em um mesmo tanque de controle.

Dois padrões de escoamentos foram observados. O primeiro caracteriza-se pela passagem da água pela ranhura, formando um jato que passa direto pelo centro do tanque, com duas grandes recirculações adjacentes a este fluxo principal encaminhando-se para a próxima abertura. Esse padrão foi observado para uma ampla faixa de vazões no modelo com declividade de 5%. No segundo padrão, uma significativa parte do escoamento que entra no tanque passa próxima à parede lateral longitudinal direita, junto ao fundo, sendo que uma parte deste escoamento passa para a próxima ranhura pelo fundo; enquanto que o restante eleva-se para a superfície e então se encaminha para a próxima ranhura. No outro lado, entre os septos menores, há a formação de uma recirculação e de uma recirculação menor próxima ao septo maior. Esse segundo padrão foi observado nos modelos com declividades de 10 e 20%. A Figura 2.35 apresenta esses dois padrões de escoamento de forma esquemática.

Para os modelos com declividades de 10 e 20%, Wu *et al.* (1999) verificaram que as menores vazões que ainda possibilitam a passagem dos peixes são, respectivamente, 31 e 39 l/s. Para valores menores, os autores observaram ressaltos hidráulicos e regiões secas nos tanques.

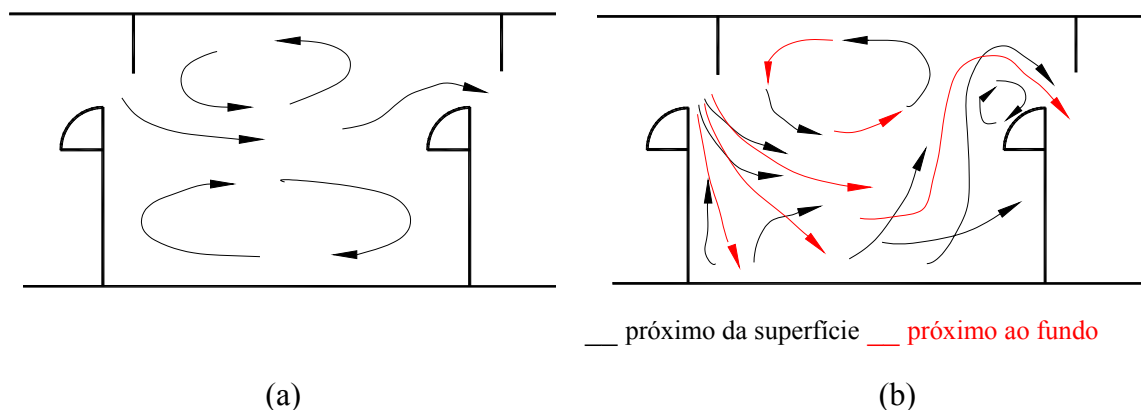


Figura 2.35 – Padrões do escoamento encontrados por Wu *et al.* (1999): (a) padrão 1; (b) padrão 2. Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (1999).

Puertas *et al.* (2004) realizaram ensaios em um modelo reduzido de uma escada para peixes do tipo ranhura vertical analisando duas geometrias diferentes (Figura 2.36) e duas declividades distintas (5,7% e 10,054%), totalizando quatro configurações, para uma faixa de

vazões ampla. O modelo reduzido constitui-se num canal de 1 m de largura onde foram montados os tanques da estrutura, totalizando 9 tanques, sendo os quatro primeiros com a geometria T2, um tanque de transição, e os quatro últimos com a geometria T1 (Figura 2.36). Foram realizadas medições de níveis com sonda de nível e medições de velocidades tridimensionais utilizando sondas ADV (acoustic Doppler velocimeter). Os autores encontraram, como se esperava, duas regiões distintas: uma região caracterizada pelas máximas velocidades, e uma região de recirculação, com baixas velocidades e turbilhões horizontais. Puertas *et al.* (2004) afirmam que para uma dada declividade de canal, em qualquer ponto do tanque, principalmente na ranhura, pode-se considerar que a velocidade independe da vazão e é constante com a profundidade.

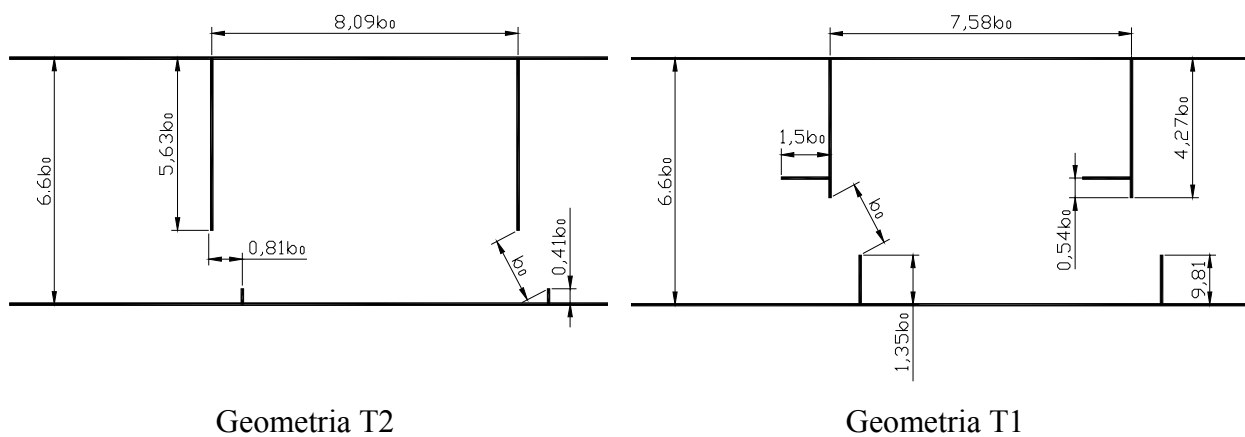


Figura 2.36 – Geometria dos modelos estudados por Puertas *et al.* (2004) e Pena (2004).

Fonte: Adaptado de Puertas *et al.* (2004).

Puertas *et al.* (2004), avaliando os campos de velocidades, podem representar os padrões gerais do escoamento nos quatro modelos, conforme a Figura 2.37.

O estudo apresentado por Puertas *et al.* (2004) faz parte dos resultados apresentados na tese de doutorado de Pena (2004). Pena (2004) estudou o comportamento hidráulico de escadas para peixes do tipo ranhura vertical, de acordo com os modelos da Figura 2.36, e além disso, avaliou essas mesmas geometrias com variações na ranhura vertical. Foram analisadas escadas com aberturas parciais que não chegam até o fundo do canal, conforme Figura 2.38, com diferentes alturas “z” estudadas ($z = 10, 20, 30, 40$ e 50 cm).

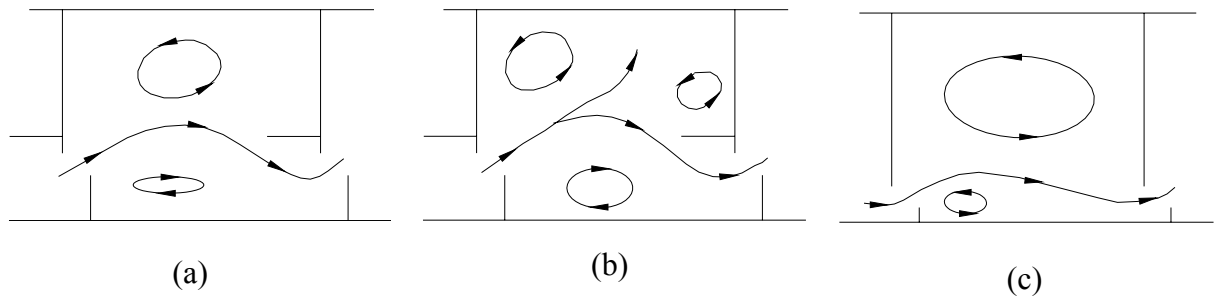


Figura 2.37 – Padrões do escoamento nos tanques encontrado por Puertas *et al.* (2004) – (a) Geometria T1, $S_0 = 5,7\%$ e $S_0 = 10,054\%$ com $Q^A < 2,75$; (b) Geometria T1, $S_0 = 10,054\%$ com $Q^A > 2,75$ e (c) Geometria T2 (Q^A definida pela Eq. (2.17)). Fonte: Adaptado de Puertas *et al.* (2004).

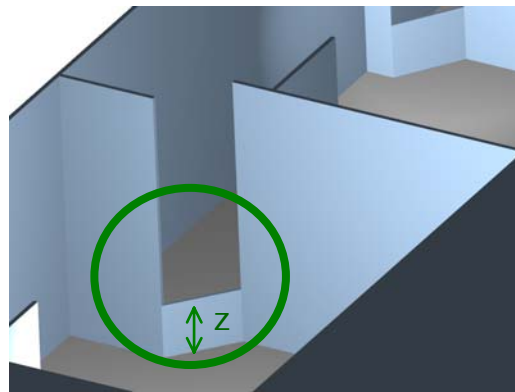


Figura 2.38 – Esquema da escada para peixes do tipo ranhura vertical com interrupção na base da abertura, estudada por Pena (2004). Adaptado de Pena (2004).

Os padrões de escoamento em escadas com ranhuras parciais, em oposição as estruturas com ranhura vertical total, são mais complexos. O escoamento deixa de ser bidimensional e há uma grande diferença na recirculação de água nos planos superiores e inferiores a altura “z” da obstrução (Pena, 2004).

Viana (2005) realizou estudos experimentais em um modelo reduzido, referente a escada para peixes da UHE de Igarapava, e comparou os resultados obtidos com medições de protótipo. Também foram realizados estudos sobre a capacidade natatória de alguns peixes nacionais, procurando uma nova formulação para o projeto eficiente dos MTP no Brasil.

Coletti (2005) também realizou estudos em modelo reduzido referentes a escada para peixes da UHE de Igarapava. Nesse estudo foram avaliados alguns parâmetros hidráulicos do escoamento e foram gerados campos de pressão e velocidade para um tanque padrão da escada.

2.6.2.1 Avaliação da vazão adimensional

Rajaratnam *et al.* (1986) apresentaram a Eq. (2.15) para avaliar a vazão adimensional (Q^*). Aplicando essa relação aos seus resultados, Rajaratnam *et al.* (1986) e (1992) observaram que parece existir uma relação linear entre Q^* e a relação h_m/b_0 , definida pela Eq. (2.31), indicando que o coeficiente de cisalhamento é aproximadamente constante. A Tabela 2.7 apresenta os coeficientes α e β da Eq. (2.31) para as 18 geometrias estudadas pelos autores acima.

$$Q^* = \alpha \cdot \left(\frac{h_m}{b_0} \right) + \beta \quad (2.31)$$

Tabela 2.7 – Coeficientes da Eq. (2.31) obtidos no trabalho de Rajaratnam *et al* (1986) e (1992).

| Desenho (Figura 2.34) | α | β |
|-----------------------|----------|---------|
| 1 | 3,77 | -1,11 |
| 2 | 3,75 | -3,52 |
| 3 | 2,84 | -1,62 |
| 4 | 5,85 | 0,67 |
| 5 | 2,67 | -0,52 |
| 6 | 2,71 | 0 |
| 7 | 2,91 | -3,22 |
| 8 | 1,66 | 0 |
| 9 | 1,65 | 0 |
| 10 | 1,40 | 0 |
| 11 | 2,98 | 0 |
| 12 | 3,11 | 0 |
| 13 | 4,13 | 0 |
| 14 | 3,21 | 0 |
| 15 | 2,89 | 0 |
| 16 | 3,59 | 0 |
| 17 | 3,27 | 0 |
| 18 | 3,71 | 0 |

A Eq.(2.32) representa o ajuste dos dados de Wu *et al.* (1999) para a relação da vazão adimensional com h_m/b_0 .

$$Q^* = 3,75 \cdot \left(\frac{h_m}{b_0} \right) \quad (2.32)$$

Wu *et al.* (1999) procuraram avaliar a vazão adimensional a partir da profundidade média na ranhura (y_b). Observa-se que a razão y_b/h_m varia com a declividade e a vazão, de acordo com a Eq. (2.33). A Eq. (2.38) apresenta a relação entre a profundidade média no tanque (h_m) e a profundidade média na ranhura (y_b).

$$Q^* = 2 \cdot \left(\frac{y_b}{b_0} \right) \cdot S_0^{-0,2} \quad (2.33)$$

Puertas *et al.* (2004) avaliaram a vazão adimensional Q^A (Eq. (2.17)) e propuseram equações lineares do tipo $Q^A = \alpha (h_m/b)$. Assim, um valor de “ α ” maior indica que para uma mesma vazão, a profundidade média (h_m) é menor, e portanto as velocidades devem ser maiores, o que indica uma maior eficiência de descarga. Comparando as duas geometrias (T1 e T2 da Figura 2.36), observa-se que os coeficientes de proporcionalidade (α) obtidos na geometria T2 são maiores, indicando uma maior capacidade de descarga. Além da vazão adimensional Q^A , Puertas *et al.* (2004) avaliaram Q^* , segundo as equações (2.34) e (2.35)

$$Q^* = 2,7289 \cdot h_m / b_0 \quad \text{para o desenho T1 (Figura 2.36)} \quad (2.34)$$

$$Q^* = 3,0382 \cdot h_m / b_0 \quad \text{para o desenho T2 (Figura 2.36)} \quad (2.35)$$

Coletti (2005) propôs a Eq. (2.36) para a vazão adimensional.

$$Q^* = 2,38 \cdot (h_m / b_0)^{1,19} \quad (2.36)$$

2.6.2.2 Avaliação do coeficiente de descarga

Rajaratnam *et al.* (1992), ao avaliarem o coeficiente de descarga, observaram que a maioria das geometrias atinge um C_d constante acima de um determinado valor de h_m/b_0 . No entanto, o autor considera que apenas a avaliação deste coeficiente não é suficiente para avaliar o desempenho de uma escada para peixes do tipo ranhura vertical. A avaliação do coeficiente de cisalhamento entre o jato principal e a zona de recirculação mostrou que, para a maioria dos modelos, este não varia com a relação h_m/b_0 .

A Figura 2.39 apresenta os coeficientes de descarga obtidos nos ensaios conduzidos por Rajaratnam *et al.* (1986) e Rajaratnam *et al.* (1992).

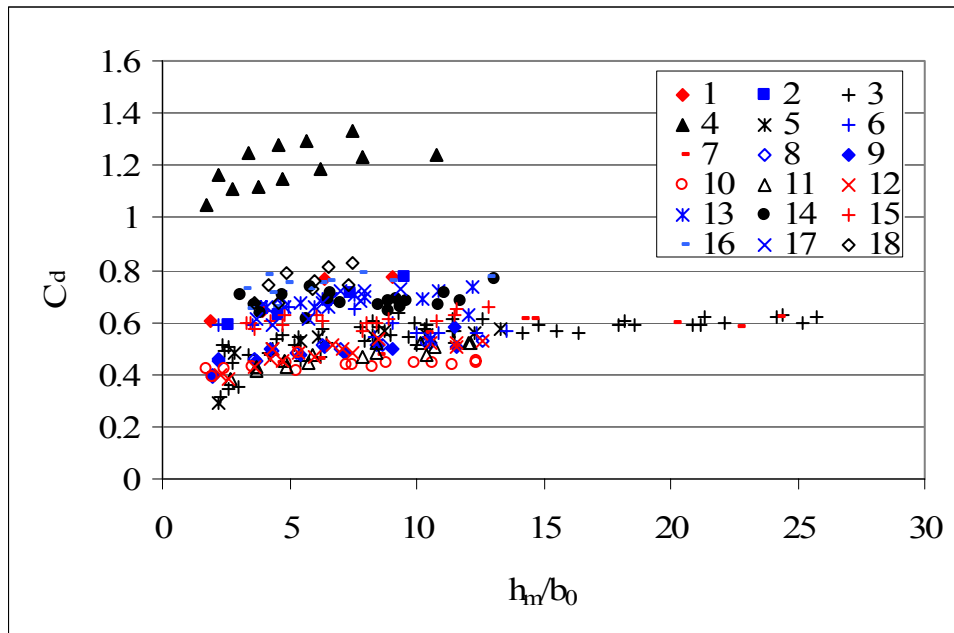


Figura 2.39 – Coeficiente de descarga para as diferentes geometrias (1 a 18 da Figura 2.34) estudadas por Rajaratnam *et al.* (1986) e Rajaratnam *et al.* (1992).

Coletti (2005) encontrou a seguinte equação para o coeficiente de descarga:

$$C_d = 0,62 \cdot (y_0 / b_0)^{0,13} \quad (2.37)$$

2.6.2.3 Avaliação da superfície livre do escoamento

Wu *et al.* (1999) calcularam a profundidade média (h_m) para os ensaios nos modelos com declividade de 10 e 20%, através do cálculo do volume de água no tanque dividido pela área do mesmo. Para a declividade da escada de 20%, observou-se que o valor de h_m é levemente superior a profundidade encontrada no centro do tanque, enquanto que para a declividade de 10%, ambas as profundidades (h_m e no centro) podem ser consideradas iguais.

Wu *et al.* (1999) propuseram a Eq. (2.38) para relacionar a profundidade média no tanque (h_m) com a profundidade média na ranhura (y_b).

$$y_0 = 0,533 \cdot y_b \cdot S_0^{-0,2} \quad (2.38)$$

Puertas *et al.* (2004) e Pena (2004) analisaram a superfície d'água, para uma mesma vazão, e observaram que nos quatro modelos há uma região de máximas profundidades a montante da ranhura, assim como a jusante, na região próxima do septo maior. Na região da ranhura observaram a ocorrência de uma queda brusca na profundidade, que continua na direção do jato que se forma a jusante da abertura. Puertas *et al.* (2004) afirmam que o comportamento geral das profundidades é independente das vazões. Essa estabilidade de

comportamento, independente da descarga, é uma das características mais importantes dos mecanismos de transposição de peixes do tipo ranhura vertical. A Figura 2.40 ilustra as linhas de nível da superfície livre do escoamento para uma das situações ensaiadas.

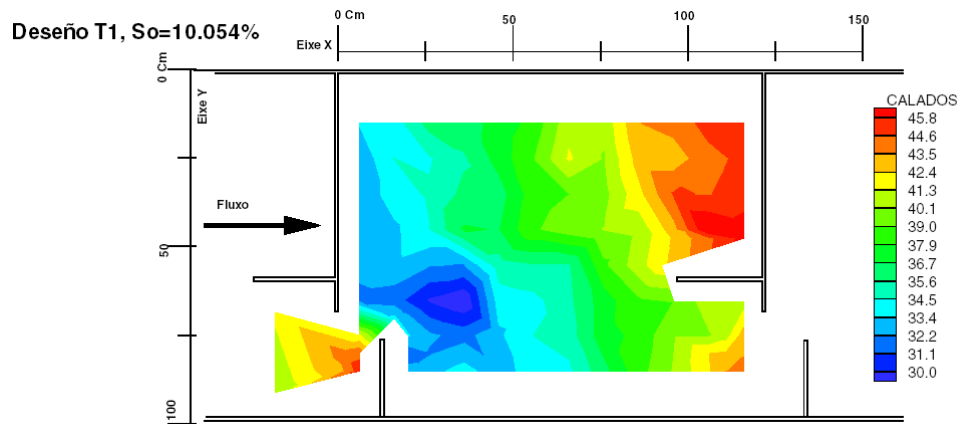


Figura 2.40 – Linhas de nível da superfície livre do escoamento para uma vazão de $0,065 \text{ m}^3/\text{s}$, no modelo de geometria T1 e declividade do canal de 10,054%. Fonte: Pena (2004).

2.6.2.4 Avaliação de velocidades

Wu *et al.* (1999) observaram que para os modelos de escadas com declividades maiores, as velocidades próximas da superfície são menores, e as componentes verticais em vários pontos são significativas. Essas características indicam que o escoamento que passa na ranhura não é um jato uniforme retangular lançado perpendicular às fendas. As máximas velocidades encontradas foram próximas do fundo e quase iguais a $\sqrt{2g\Delta h}$.

Wu *et al.* (1999) observaram que para o escoamento no padrão 1 (Figura 2.35a), a velocidade máxima ocorre próxima da superfície, enquanto que para o padrão 2 (Figura 2.35b), ocorre próxima ao fundo.

Wu *et al.* (1999) avaliaram as velocidades na ranhura e no tanque. Para a escada com declividade de 5%, observaram que os valores de velocidade na ranhura são aproximadamente os mesmos ao longo da profundidade, com exceção dos valores obtidos próximos à superfície. Além disso, em algumas profundidades observaram componentes verticais de velocidade, principalmente próximo ao septo menor.

Puertas *et al.* (2004), avaliando as componentes verticais de velocidades, verificaram que estas são raramente significantes, sendo o escoamento praticamente bidimensional. Observaram também, que analisando as velocidades de diferentes planos horizontais, estes

variam pouco com a profundidade. Segundo os autores, esse caráter bidimensional do escoamento, diferente do encontrado em MTP do tipo soleira vertedoura e tipo Denil, favorece a transposição pelos peixes que podem escolher a profundidade de sua preferência, já que não ocorrem variações significativas na direção vertical.

Puertas *et al.* (2004) verificaram que a velocidade em um determinado ponto depende da posição em si, da geometria e da declividade da escada, mas não está relacionada com a vazão, não sofrendo alterações com a variação desta.

Uma análise mais detalhada foi realizada na região da ranhura, já que esta representa uma seção crítica da estrutura. Verificando as velocidades ao longo da profundidade para várias descargas, Puertas *et al.* (2004) constataram que as velocidades na seção da ranhura são praticamente constantes para uma mesma geometria e declividade, da mesma maneira que se verificou nos tanques. Então, a velocidade na ranhura depende da largura da abertura, da declividade da escada (a velocidade aumenta com a declividade) e da configuração geométrica dos septos.

Pena (2004) observou que nos modelos com ranhura parcial (Figura 2.38) existem componentes verticais de velocidade mais significativas, o que não se encontra nos modelos de ranhura vertical livre. Mesmo com a ranhura parcial, observou-se que existe uma configuração geral da superfície livre do escoamento diferente para cada um dos modelos (T1 e T2), mas independente da vazão e da altura “z” da obstrução parcial da ranhura.

2.6.2.5 Avaliação em modelo reduzido do campo de pressões

Coletti (2005) realizou ensaios de pressão instantânea no fundo de um tanque de um modelo de MTP do tipo ranhura vertical. Foram adquiridos dados de pressão com frequência de 50 Hz. A partir desses dados foi possível traçar o mapa de pressões médias e das flutuações de pressão. A Figura 2.41 apresenta o campo de pressões médias e o um mapa representando a variação das flutuações através do desvio padrão.

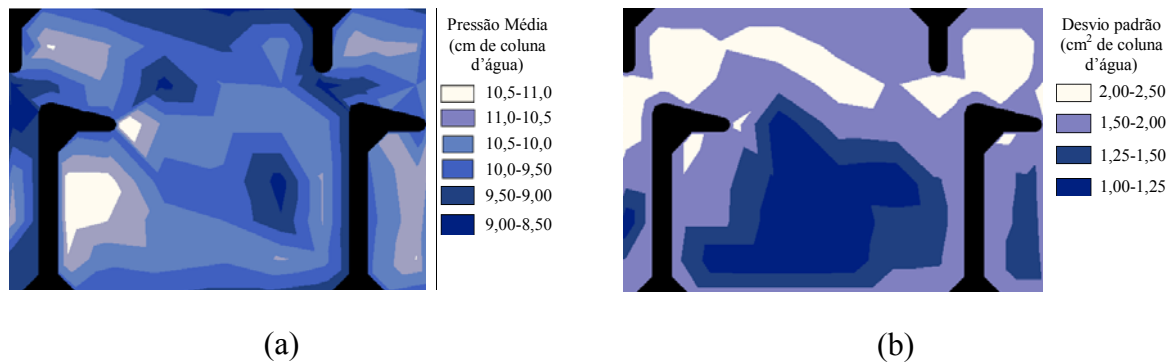


Figura 2.41 – Resultados obtidos por Coletti (2005) para um modelo na escala 1:20, com declividade de 6% e vazão em protótipo de 1,21 m³/s. (a) campo de pressões, (b) campo dos desvios padrões. Fonte: Coletti (2005).

2.6.2.6 Avaliação da dissipação de energia

Rajaratnam *et al.* (1992), a partir dos resultados obtidos com o modelo da geometria 13 (Figura 2.34), observaram que diminuindo a largura da escada para peixes, ocorre uma diminuição da dissipação de energia e as velocidades do jato permanecem altas, porém com profundidades menores. Observa-se que menores larguras do canal resultam em maiores níveis de turbulência nos tanques. Nesta situação o peixe encontraria dificuldades de encontrar uma zona de descanso (de pouca turbulência) após a passagem pelas ranhuras. Por isso, os autores recomendam uma largura em torno de $8b_0$ para escadas para peixes do tipo ranhura vertical.

Rajaratnam *et al.* (1992) observaram que o aumento do comprimento dos tanques resulta numa maior dissipação de energia e, conseqüentemente, das velocidades na ranhura. Após a avaliação de diferentes relações de largura/comprimento dos tanques, Rajaratnam *et al.* (1992) recomendaram a utilização de tanques de comprimento em torno de $10b_0$ e largura $8b_0$.

Analisando apenas os modelos com largura $8b_0$ e comprimento $10b_0$, Rajaratnam *et al.* (1992) verificaram dois grupos com comportamentos semelhantes. Um deles formado pelos modelos com as geometrias 1, 2, 14, 16, 17 e 18 e outro pelas geometrias 3, 5, 6 e 7. Os autores recomendam utilizar os desenhos 17 e 18 do primeiro grupo e o desenho 6, no segundo, pela facilidade construtiva.

Rajaratnam *et al.* (1992) avaliaram também a potência dissipada por unidade de volume (Eq. (2.18)). Observou-se que a variação desta com a relação h_m/b_0 é influenciada não só pela diferença na geometria como também pela declividade da escada. O maior valor

encontrado no trabalho de Rajaratnam *et al.* (1992) foi de 1,2 kW/m³, e o menor foi de 0,1 kW/m³.

Wu *et al.* (1999) observaram que para cada declividade de calha, a partir de certa vazão, a potência dissipada por unidade de volume assumiu um valor constante. Para os modelos ensaiados representando escadas com ranhuras de 0,305 m de largura e declividades de 5, 10 e 20%, os valores de potência dissipada por unidade de volume foram 89, 251 e 709 W/m³, respectivamente. Combinando as equações (2.18) e (2.32), Wu *et al.* (1999) estabeleceram a Eq. (2.39), onde para uma determinada calha e abertura da ranhura, a potência dissipada por unidade de volume (ε) é proporcional a:

$$\varepsilon = 3,75 \cdot \rho \cdot (g \cdot S_0)^{1,5} \cdot \frac{b_0}{L} \cdot \sqrt{b_0} \quad (2.39)$$

Puertas *et al.* (2004) analisaram a potência dissipada por unidade de volume (ε) e verificaram que esta permanece constante para diferentes vazões e que para uma mesma declividade da escada, a mudança na geometria altera pouco o valor de ε . A Tabela 2.8 apresenta os valores de potência dissipada encontrados nos experimentos de Puertas *et al.* (2004) em modelo e transpondo os resultados para uma escala de protótipo correspondente a dimensão da ranhura igual a 0,305m.

Tabela 2.8 – Potência dissipada por unidade de volume (W/m³) para os modelos e correspondentes protótipos ($b_0 = 0,305$ m). Fonte: Puertas *et al.* (2004).

| Geometria | $S_0 = 5,7\%$ | | $S_0 = 10,054\%$ | |
|-----------|---------------|-----------|------------------|-----------|
| | Modelo | Protótipo | Modelo | Protótipo |
| T1 | 71,44 | 98,63 | 177,49 | 245,05 |
| T2 | 70,57 | 100,63 | 181,06 | 258,18 |

De acordo com Puertas *et al.* (2004), a passagem dos peixes pela escada está diretamente relacionada à turbulência e à aeração nos tanques. Tradicionalmente utiliza-se a potência dissipada por volume unitário (ε , Eq. (2.18)), como um indicador do nível de turbulência nos tanques. Algumas vezes esse termo é tratado simplesmente por energia dissipada.

2.6.2.7 Avaliação da turbulência do escoamento

A turbulência do escoamento pode deixar os peixes desorientados, por isso, parâmetros de turbulência (energia cinética da turbulência, taxas de dissipação, entre outros) devem ser avaliados. Puertas *et al.* (2004) procuraram avaliar a dissipação de energia cinética.

A série de velocidades pode ser dividida em uma componente de velocidade média (V_i) e uma componente turbulenta (v_i'):

$$V_i(t) = V_i + v_i' \quad (2.40)$$

sendo $V_i(t)$ a série total de velocidades ao longo do tempo.

A energia cinética da turbulência (k) pode ser calculada pela Eq. (2.41), como definido por Rodi (1980), apud (Puertas *et al.*, 2004):

$$k = \frac{1}{2} \left(v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2 \right) \quad (2.41)$$

Onde v_x' , v_y' e v_z' representam a raiz da média das flutuações quadráticas de velocidade (desvio padrão da série temporal), para as componentes da velocidade longitudinal, transversal e vertical, respectivamente

Puertas *et al.* (2004) e Pena (2004) avaliaram a energia cinética da turbulência em diferentes zonas do escoamento quanto à turbulência: zonas com maior turbulência, zonas com turbulência intermediária e zonas de baixa turbulência. Os autores observaram que nas zonas de recirculação, os valores de energia cinética da turbulência apresentaram os menores valores.

Quanto a energia cinética da turbulência (k), Pena (2004) comenta que para os modelos de ranhura vertical, pode-se relacionar as zonas de alta energia turbulenta com a posição do jato, onde as velocidades são maiores. Nos modelos com ranhura parcial, verifica-se esta relação para as regiões acima da altura “Z”.

Puertas *et al.* (2004) e Pena (2004) verificaram que nas regiões de baixa e média turbulência, a energia cinética da turbulência geralmente não se altera ao longo da profundidade. Entretanto, nas regiões altamente turbulentas, observaram que os valores de energia cinética da turbulência são maiores próximos ao fundo e próximos à superfície livre. Para essas regiões de maior turbulência, os autores propuseram a energia cinética da turbulência adimensionalizada (k_A), dada pela equação (2.42). A Figura 2.42 apresenta o comportamento de k_A ao longo da profundidade, na região de maior energia cinética da turbulência, para as duas geometrias estudadas e para diferentes vazões.

$$k_A = k \cdot \left(\frac{b_0}{V_{mr} \cdot \sqrt{L \cdot B}} \right)^2 \quad (2.42)$$

Sendo V_{mr} a velocidade média na ranhura.

O escoamento em escadas para peixes do tipo ranhura vertical é de natureza altamente turbulenta, e os modelos numéricos se tornam complexos para a modelagem da turbulência. Uma solução usual é modelar as tensões de Reynolds utilizando a hipótese de

Boussinesq, que relaciona o tensor de deformação da velocidade média por meio da viscosidade turbulenta (Pena, 2004). A consideração da viscosidade turbulenta como uma magnitude isotrópica é uma das limitações desses modelos, já que no caso geral de turbulência anisotrópica, devem ser consideradas seis viscosidades diferentes, uma para cada tensão de Reynolds.

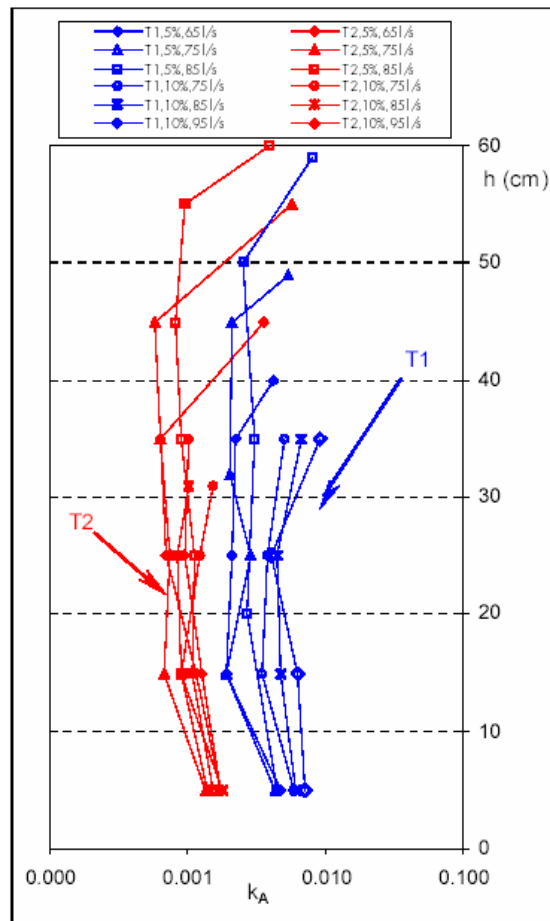


Figura 2.42 – Resultados de energia cinética da turbulência adimensionalizada (k_A) ao longo da profundidade do escoamento, para as geometrias estudadas e para as diferentes vazões, na região de maior turbulência, obtidos por Puertas *et al.* (2004) e Pena (2004).

Fonte: Pena (2004).

Pena (2004) realizou um estudo das frequências para comprovar a isotropia ou anisotropia da turbulência do escoamento em escadas tipo ranhura vertical total e parcial.

Espera-se que em um escoamento turbulento completamente isotrópico, os espectros de frequência das três componentes de velocidade se superponham. Os resultados obtidos por Pena (2004) indicam isotropia clara somente no plano XZ (plano vertical ao longo do comprimento da escada). A componente transversal ao escoamento (v'_y) apresentou-se menos

energética, enquanto as componentes v'_x e v'_z mantiveram uma grande semelhança, principalmente nas menores escalas.

Avaliando a parte inercial do espectro de energia pode-se separar a macroturbulência da microturbulência. Na parte inercial não existe ganho ou dissipação de energia e é governada pela lei de Kolmogorov. Segundo a lei de Kolmogorov, pode-se traçar uma linha com declividade igual a $-5/3$ no espectro em escala log-log, para a parte inercial. A transição entre as escalas que contém a energia (macroturbulência) e as escalas dissipativas (microturbulência) ocorre para declividades menores que a de Kolmogorov. A declividade de Kolmogorov foi obtida mais claramente na componente transversal da velocidade turbulenta (v'_y).

Pela análise espectral, Pena (2004) considera que o escoamento seja anisotrópico, embora se observe isotropia no plano XZ.

Outra maneira de avaliar a isotropia da turbulência é através da Eq. (2.43), proposta por Cea (2003) *apud* Pena (2004).

$$C_i = \frac{(v'_x{}^2 - v'_y{}^2)^2 + (v'_x{}^2 - v'_z{}^2)^2 + (v'_y{}^2 - v'_z{}^2)^2}{(2 \cdot k)^2} \quad (2.43)$$

Para a situação de turbulência totalmente isotrópica o valor de C deve ser igual a zero, sendo que o aumento deste valor eleva o nível de anisotropia do escoamento. Pena (2004) observou uma relação entre o coeficiente de isotropia C com os resultados obtidos com os espectros de energia.

Ressalta-se que as avaliações da turbulência do escoamento apresentadas por Pena (2004) foram realizadas a partir de medições com o velocímetro acústico Doppler. Os dados obtidos com esse equipamento possuem ruído branco, que é inerente ao processo de medição por efeito Doppler. Não há informações no texto se o autor utilizou algum filtro para eliminar os efeitos provenientes do ruído.

Liu (2004) avaliou parâmetros da turbulência do escoamento na mesma configuração do modelo de escada para peixes do tipo ranhura vertical avaliado por Wu *et al.* (1999), para duas declividades, através de medições de velocidade utilizando um ADV. Liu (2004) apresentou os campos médios de velocidade e campos de parâmetros de turbulência, como energia cinética da turbulência, tensões de Reynolds, taxas de dissipação de energia e microescala (definida por Taylor, 1935). Além disso, a autora avaliou a estrutura do jato principal dentro do tanque em comparação com um jato plano.

2.7 Aspectos Biológicos

2.7.1. Introdução

Alguns dos impactos causados pela construção de reservatórios devem-se a transformação de ambientes lóticos em ambientes lênticos. As águas introduzidas no reservatório sofrem alterações físicas e químicas em relação a condição natural. Essa mudança de ambiente lótico para lêntico afeta os organismos aquáticos que vivem em águas com características típicas de águas correntes como alta taxa de oxigênio dissolvido. Entre os peixes que preferem os ambientes lóticos destacam-se os de piracema, como o dourado (*Salminus maxillosus*), o curimatá (*Prochilodus scrofa*) e o pacu (*Piaractus mesopotanicus*). As espécies brasileiras que realizam a piracema são potamódromas, ou seja, que se desenvolvem ao longo de todo o ciclo no corpo do rio (águas doces), diferente das espécies anádromas ou catádromas, que têm fases do seu ciclo em águas salobras, ou que se reproduzem apenas nas cabeceiras dos rios onde nasceram, como os salmões de rios do hemisfério norte (Müller, 1995).

A piracema é comandada por processos físico-químicos relacionados com a elevação do nível das águas, que normalmente ocorre em épocas de fotoperíodo mais prolongado e com temperaturas mais elevadas. Essas condições induzem a ictiofauna a um processo reofílico (de nadar contra a correnteza). Os peixes gastam energia neste processo, queimando gorduras, o que ativa os mecanismos hormonais, preparando-os para a reprodução. As fêmeas iniciam a desova, que atrai os machos igualmente maduros sexualmente, que então expõem o esperma. Os óvulos fecundados passam por um processo higroscópico mantendo-os a uma pequena profundidade abaixo da superfície e são levados com a correnteza para lagoas marginais, assim a larva eclode e se desenvolve em águas tranquilas, até que ocorra a próxima cheia, e então os peixes jovens retornam ao rio (Müller, 1995).

Dessa maneira, a construção de barragens diminui o espaço para migração reprodutiva e diminui o pico das cheias. Essa diminuição dos picos das cheias reduz a ativação reofílica. Os peixes de jusante são obrigados a se reproduzir próximos aos canais de fuga, e os de montante costumam procurar os rios tributários para a sua reprodução (Muller, 1995).

Acredita-se que os peixes reofílicos dependem da dinâmica fluvial para sua perpetuação. Com a construção de um reservatório, mudando o ambiente lótico para lêntico, os peixes reofílicos podem viver alguns anos, mas não se reproduzem. Para que ocorra a reprodução, é necessário que o peixe se movimente e se canse através da migração. O peixe necessita migrar da região de alimentação, crescimento e engorda para a região de

reprodução, nas cabeceiras dos rios. Após a desova, os peixes retornam aos locais de alimentação, onde passam o inverno.

Durante o planejamento de um novo barramento deve-se estudar a ictiofauna local, buscando conhecer as suas características reprodutivas, alimentares, natatórias e migratórias, para que sejam tomadas medidas no sentido da conservação da vida aquática no período de construção e vida útil do barramento. Embora uma passagem para peixes seja uma obra de engenharia, é fundamental a integração das características da ictiofauna com as características do escoamento dentro da estrutura, como o posicionamento da entrada e saída da mesma, entre outros itens que influenciam na eficiência do mecanismo.

Nos próximos itens são apresentadas algumas informações gerais sobre características e fatores biológicos que devem ser considerados no projeto de passagens para peixes.

2.7.2. O Processo da Migração e os Peixes

Os peixes migram por três razões principais segundo Heape (1931) e Nikolsky (1963) *apud* Holden e Raitt (1974): para reprodução, para alimentação e no inverno.

Segundo Holden e Raitt (1974), a classificação dos peixes migratórios adotada geralmente é a proposta por Meyer em 1949, apresentada na seqüência.

- **Diádromos:** são peixes que podem permanecer tanto no mar quanto em rios. Entre os diádromos, existem os anádromos, catádromos e anfídromos.
 - o Anádromos: são diádromos que passam a maior parte da vida no mar e procuram a água doce para reprodução. Entre eles estão o salmão, truta do mar, alosa, lampreia do mar e esturjão.
 - o Catádromos: são diádromos que passam a maior parte da vida nos rios e migram para o mar na época de reprodução. Como exemplos têm-se as enguias, *Salangidae*, *Galaxidae* e *Retropinnidae*.
 - o Anfídromos: são diádromos que migram do mar para os rios ou vice-versa, mas sem fins reprodutivos. Exemplos: alguns *Exocidae*, *Perca fluviatilis* e alguns *Mugilidae*.
- **Potamódromos:** são peixes cuja migração ocorre exclusivamente em águas doces. Entre eles estão a truta, *bream*¹ e *Coregonoids*.
- **Oceanódromos:** são peixes que vivem e migram unicamente no mar, como o bacalhau, arenque, *capelin*², atum e *mackere*.

¹ Vocábulo não traduzido, já que o termo *bream* não se refere a um nome científico, sendo utilizado para descrever peixes de diferentes gêneros e famílias.

A maioria dos migradores brasileiros enquadra-se entre os potamódromos.

As distâncias percorridas durante a migração de alguns peixes pode chegar até 1500 km (Petreire, 1985 *apud* Quirós, 1989) e normalmente ultrapassa 200 km (Welcomme, 1985 *apud* Quirós, 1989). Segundo Quirós (1989), as velocidades médias podem exceder 20 km/dia. O comportamento natatório dos peixes varia em função da espécie, das condições hidrológicas do rio e da fase em que ele se encontra dentro do seu ciclo. Segundo Trujillo Zevallos e Tamada (2001), há registros de distâncias migratórias de até 6000 km em peixes que percorrem apenas rios.

Poddubnyi *et al.* (1981) *apud* Quirós (1989) realizaram ensaios durante o período migratório no rio Paraná. Foram selecionados alguns peixes, que foram marcados com cápsulas ultra-som e monitorados por vários dias. Os peixes da espécie *Prochilodus platensis* apresentaram atividade de migração apenas durante o dia, com três picos de atividades mais intensas (às 8 h, às 12 h e às 16 h), sendo que a máxima velocidade de migração foi de aproximadamente 1 km/h, mantida durante 90 minutos. Em estudos similares conduzidos no reservatório/rio Salto Grande observou-se atividades dos peixes durante o dia e a noite, com velocidades máximas registradas de 0,45 km/h. Um indivíduo da espécie *Salminus maxillosus* foi monitorado durante nove dias. Esse peixe se movimentou em uma pequena área do rio, caracterizando três picos de maior atividade durante o dia e não apresentando atividade durante a noite. As máximas velocidades contra a correnteza chegaram a 2 km/h. No reservatório de Salto Grande, a velocidade máxima atingida pelos *Salminus* foi de 1,3 km/h. As espécies *Pseudoplatystoma coruscans* e *Luciopimelodus pati* apresentaram velocidades máximas contra a correnteza de 2,6 e 1,0 km/h, respectivamente. Esses peixes apresentaram atividades diurnas e noturnas. Poddubnyi *et al.* (1981) verificaram que os peixes da espécie *Prochilodus* e *Salminus* seguem os gradientes de velocidade do escoamento, enquanto os *Pseudoplatystoma* e *Luciopimelodus* preferem as regiões próximas do fundo, onde as velocidades são menores. De um modo geral, as velocidades médias diárias de migração ficaram entre 5 e 17 km/dia.

Em 1989, Quirós comentou que não haviam informações sobre as velocidades de explosão dos peixes da América Latina e ainda menos sobre como as velocidades estão relacionadas com o tamanho do peixe, morfologia funcional e temperatura da água. Alguns estudos permitem a definição dos limites inferiores de velocidades máximas, como os realizados por Godoy (1985), por exemplo.

² *Capelin* é um pequeno peixe, cujo nome científico é *Mallotus villosu*, encontrado nos oceanos Atlântico e Ártico.

De acordo com Godoy (1985), pesquisadores americanos verificaram que o salmão e a truta conseguem vencer velocidades de até 6,73 m/s e 8,13 m/s, respectivamente. Godoy (1985) relata algumas observações sobre peixes encontrados nos rios brasileiros:

- Durante a construção da Itaipu Binacional, o Rio Paraná foi desviado por um canal aonde as velocidades chegaram a 25 m/s. Observaram-se migrações reprodutivas de pacus (*Colossoma mitrei*) e dourados (*Pseudoplatystoma corucans*) por esse canal.

- No Rio Paraná, foram marcados, colocados abaixo e recuperados acima do Salto de Urubupungá (desnível de 18 m), curimatás (*Prochilodus scrofa*), dourados, piavas (*Leporinus copelandii*) e mandis (*Pimelodus clarias*), aonde no percurso a água chegava a velocidade de 13,8 m/s.

- No Rio Paranaíba, Canal de São Simão, foram marcados curimatás e dourados, que percorreram os quase 8 km do canal com água a velocidades de 15 m/s.

- No Rio Tietê, Salto de Itapura, verificaram-se mandis transpondo um desnível de 12 m, com velocidades de 13,8 m/s.

- No Rio Grande, abaixo das Cachoeiras dos Patos e do Marimbondo, observaram-se curimatás, dourados e outros que conseguiram subir a correnteza com velocidades de 15 m/s.

- Em Cachoeira das Emas, Rio Mogi Guaçu, observaram-se curimatás, dourados, piavas, mandis e outros peixes vencendo correntezas de 6 a 12 m/s. Na escada para peixes em Cachoeira de Emas, a passagem do último tanque para o reservatório era de 1,80 m, e muitos peixes ultrapassavam este obstáculo.

- No Rio Pardo, barragem de Itaipava, foram registrados curimatás e dourados vencendo velocidades de 20 m/s e dando saltos de 4 m de altura e 5 m de extensão.

No entanto, esses valores apresentados por Godoy (1985), provavelmente representam as velocidades máximas médias nos pontos de maiores velocidades. É provável que algumas espécies migrem seguindo o curso d'água nas regiões próximas às rochas e às paredes dos rios, sendo que possivelmente os valores mencionados pelo autor não representam as velocidades reais a que o peixe esteve submetido, sendo estas bem inferiores.

2.7.3. Capacidade Natatória

O comportamento natatório dos peixes pode ser classificado de acordo com os tipos de esforços utilizados na atividade. A seguir comenta-se sobre a classificação proposta por Blaxter, 1969, Bell, 1986 e Webb, 1975 *apud* Larinier (2002a):

- **velocidade de cruzeiro:** representa uma atividade natatória que pode ser mantida por períodos longos (horas), sem causar alterações fisiológicas nos peixes. Nesta atividade é utilizada a atividade muscular aeróbica (músculos vermelhos);

- **velocidade sustentada:** é uma atividade que pode ser mantida por alguns minutos, mas causa cansaço no peixe, utilizando mecanismos aeróbicos e anaeróbicos;

- **velocidade de explosão:** caracteriza-se por grande esforço, podendo ser mantido por alguns segundos, de acordo com o tipo de peixe, comprimento e temperatura da água. Esse esforço relaciona-se com mecanismos anaeróbicos que envolvem a transformação do glicogênio muscular para formar ácido láctico. Esse tipo de esforço não pode ser muito repetido, porque altas concentrações de ácido láctico podem inibir a contração muscular.

O conhecimento do comportamento natatório dos peixes é essencial para o sucesso das escadas para peixes. Durante o projeto dessas estruturas, deve-se buscar uma configuração geométrica que atenda as espécies-alvo locais. No entanto, nesta fase, depara-se com a falta de critérios biológicos. Algumas espécies de peixes já foram bastante estudadas, no entanto, há uma diversidade enorme, cujas características são desconhecidas ou pouco conhecidas.

Bell (1986) considera que, geralmente, os peixes utilizam a velocidade de cruzeiro para se movimentarem (mesmo durante a migração), a velocidade sustentada para a passagem por condições de fluxo de maiores velocidades e a velocidade de explosão para propósitos de alimentação e fuga. Cada uma das velocidades características de nado exigem um nível diferente de energia dos músculos, sendo que Bell (1986) assume que há uma perda de 15% na transferência da energia muscular em propulsão.

A força exercida sobre o peixe durante a natação contra a correnteza pode ser definida pela equação:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_D \quad (2.44)$$

Sendo F_D a componente da força na direção do escoamento, que é denominada arrasto, ρ a massa específica da água, U a velocidade resultante sobre o peixe (velocidade de nado – velocidade do escoamento), A a área da seção transversal do corpo do peixe, que pode ser simplificado pela área de uma elipse, C_D o coeficiente de arrasto.

A definição do coeficiente de arrasto deve ser obtido experimentalmente. A Figura 2.43 apresenta o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds do escoamento, para um corpo com geometria semelhante a forma de um peixe. Bell (1986) recomenda $C_D = 0,2$ para o salmão.

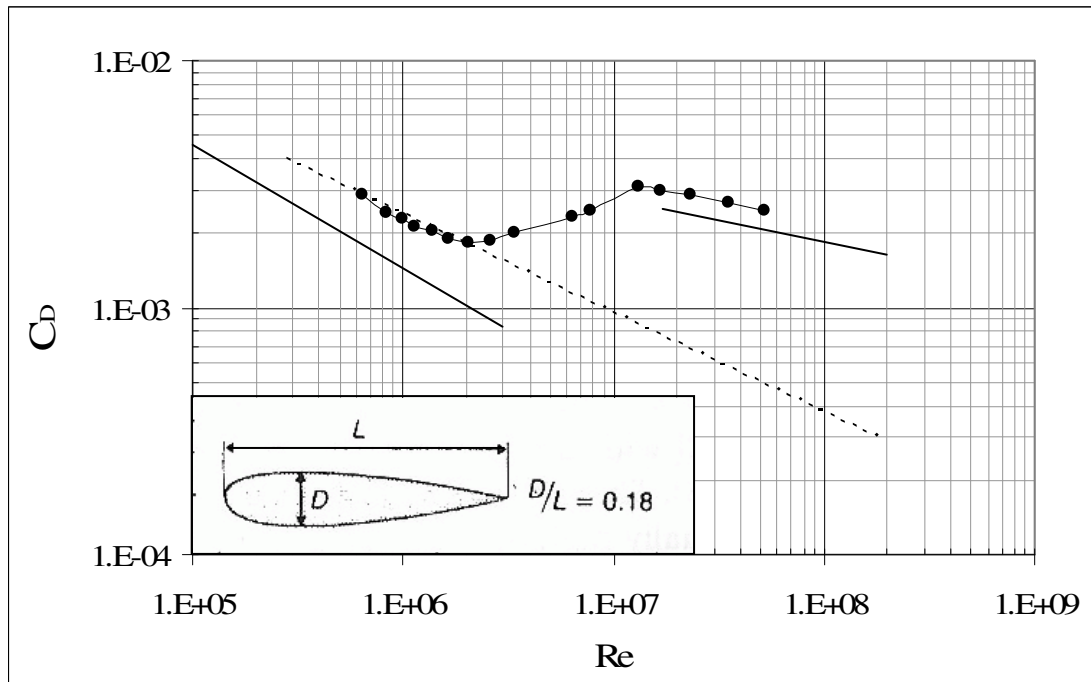


Figura 2.43 – Coeficiente de arrasto (C_D) em função do número de Reynolds (Re) para o corpo de forma hidrodinâmica, com relação $D/L = 0,18$. Fonte: Videler (1993).

O trabalho (W) realizado pelo peixe ao percorrer a trajetória de comprimento (D) é obtido a partir de:

$$W = F_D \cdot D = F_D \cdot V \cdot t \quad (2.45)$$

Sendo D o coeficiente de arrasto, C a distância percorrida, V a velocidade de deslocamento (Velocidade de nado – Velocidade do escoamento) e t o tempo utilizado na atividade. A Figura 2.44 apresenta, de um modo geral, a variação do trabalho realizado pelo peixe, em função da velocidade de nado empregada durante o percurso, de acordo com o proposto por Bell (1986).

Alguns autores, através de estudos experimentais, buscam correlacionar velocidades de nado observadas com características físicas dos indivíduos. Essas informações, embora úteis, são bastante limitadas, já que, geralmente, restringem-se a determinadas espécies.

A ondulação do corpo e a nadadeira caudal são as fontes de propulsão na maioria das espécies durante a atividade migratória (Larinier, 2002a).

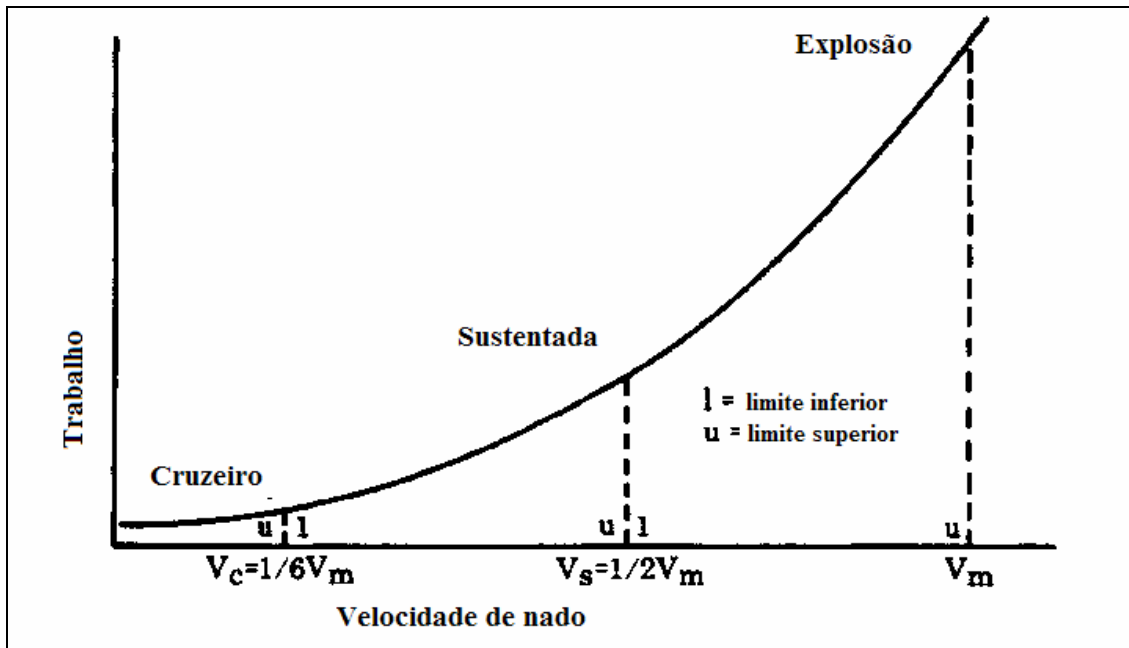


Figura 2.44 – Estimativa do trabalho exigido em função da velocidade de nado utilizada pelos peixes. Fonte: Bell (1986).

Segundo Wardle (1975) *apud* (Larinier, 2002a), a distância percorrida pelo peixe a cada ondulação do corpo está entre 0,6 e 0,8 o comprimento do corpo. Assim, tem-se que a velocidade de nado (V) pode ser expressa por:

$$V = A \cdot f \quad \text{ou} \quad V = \frac{0,7 \cdot l}{2 \cdot t} \quad (2.46)$$

Sendo: A a distância percorrida pelo peixe, f a frequência de ondulação do corpo e da nadadeira caudal, l o comprimento do peixe e t o tempo mínimo entre duas contrações dos músculos que garantem a propulsão do peixe.

Segundo os experimentos de Wardle (1975) *apud* Larinier (2002a), o tempo entre duas contrações musculares consecutivas é menor em peixes menores. O autor verificou que além do comprimento do peixe, a temperatura também é uma variável que influencia o comportamento natatório das espécies. Sendo assim, as velocidades máximas dependem especialmente do comprimento do peixe e da temperatura da água.

Um estudo realizado por Beach (1984) fornece relações para a velocidade máxima do peixe em função do seu comprimento para diferentes temperaturas da água (Figura 2.45). Outro fator importante considerado por Beach (1984) é o tempo que o peixe resiste a velocidade máxima. Esse tempo depende do comprimento do mesmo, da temperatura da água e da quantidade de glicogênio armazenado nas células dos músculos brancos. A Figura 2.46 apresenta o tempo que o peixe consegue suportar a velocidade máxima em função do comprimento do indivíduo, para diferentes temperaturas da água. Tem-se que para um

determinado comprimento, o aumento na temperatura resulta na diminuição da resistência. Essa redução resulta do fato que maiores temperaturas relacionam-se com maiores velocidades máximas, com uma taxa de depleção maior das reservas de glicogênio nos músculos, e conseqüentemente menor resistência. Os valores apresentados na Figura 2.46 correspondem ao tempo para a exaustão total do animal, não sendo recomendado que o peixe atinja este limite. Entretanto se aceita que, ao longo do percurso de migração, o peixe necessite atingir a velocidade máxima, utilizando parte da sua reserva de energia e do glicogênio anaeróbico armazenado.

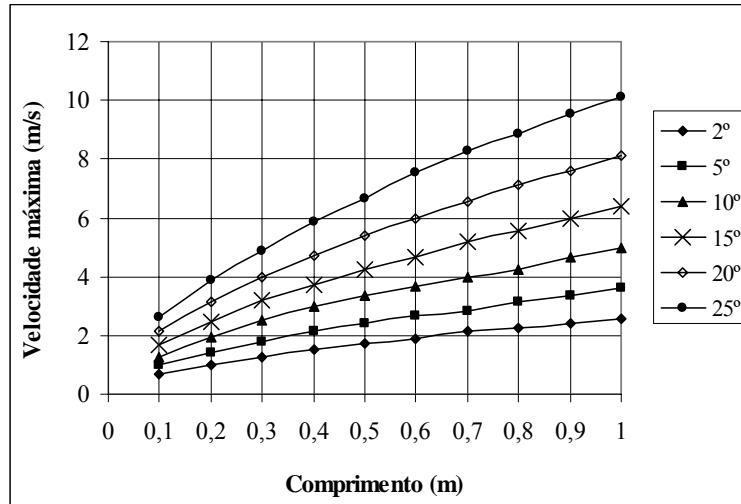


Figura 2.45 – Máxima capacidade natatória em função do comprimento do peixe para temperaturas da água entre 2° e 25°C. Adaptado de Beach (1984)

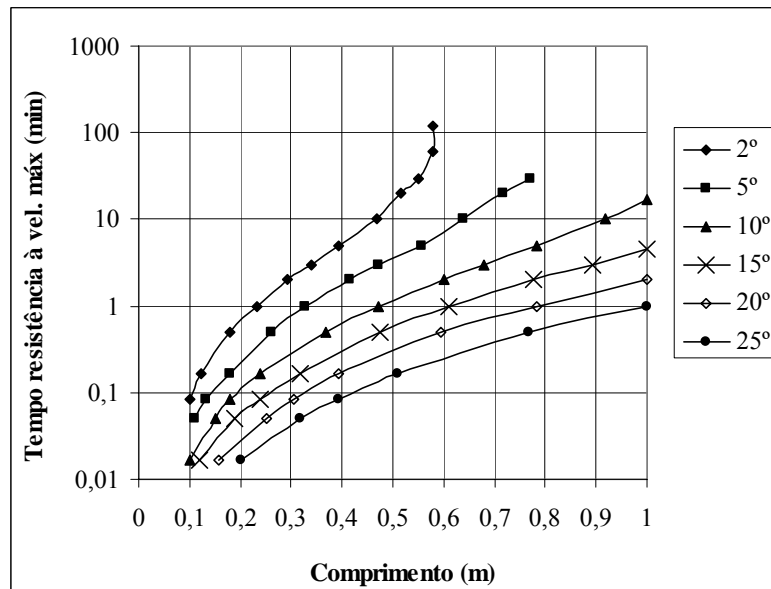


Figura 2.46 – Tempo que o peixe resiste utilizando a velocidade máxima de nado em função do comprimento do peixe para temperaturas da água entre 2° e 25°C. Adaptado de Beach (1984).

Videler (1993) propôs a equação (2.47) para descrever a velocidade de explosão (V_{\max}) dos peixes em função do comprimento do corpo (l).

$$V_{\max} = 0,4 + 7,4 \cdot l \text{ em (m/s)} \quad (2.47)$$

As equações (2.48) e (2.49) foram propostas por Videler (1993) para descrever a velocidade de cruzeiro (V_{cr}) dos peixes em função do comprimento dos mesmos.

$$V_{cr} = 0,15 + 2,4 \cdot l \text{ em (m/s)} \quad (2.48)$$

$$V_{cr} = 2,3 \cdot l^{0,8} \text{ em (m/s)} \quad (2.49)$$

Videler (1993) apresenta as equações a seguir para determinar a velocidade ótima de nado ($V_{\text{ótima}}$) em função da massa (M) do peixe. A velocidade ótima dos peixes considera a otimização dos gastos energéticos durante a natação.

$$V_{\text{ótima}} = 0,47M^{0,17} \text{ (M em Kg, V em m/s)} \quad (2.50)$$

$$V_{\text{ótima}} = 1,10M^{-0,14} \text{ (M em Kg, V em comprimentos/s)} \quad (2.51)$$

As equações (2.50) e (2.51) foram obtidas a partir de estudos com as seguintes espécies: *Liza macrolepis*, *Coregonus clupeaformis*, *Coregonus artidii*, *Oncorhynchus mykiss*, *Melanogrammus aeglefinus*, *Oncorhynchus nerka*, *Morone saxatilis*, *Pomatomus saltatrix*, *Micropterus salmoides*, *Tilapia nilotica*, *Lepomis gibbosus*, *Cymatogaster aggregata*, *Rutilus rutilus*, *Chalcalburnus chalcoides*.

A distância (D) que pode ser percorrida por um peixe contra a correnteza, pode ser avaliada a partir da seguinte equação apresentada por Larinier (2002a):

$$D = (V_{\text{peixe}} - V) \cdot t \quad (2.52)$$

Sendo V_{peixe} a velocidade de nado do peixe, V a velocidade do escoamento e t o tempo de resistência do peixe ao escoamento.

Essa expressão pode ser utilizada na definição da geometria de uma escada para peixes. Sendo conhecidas a distância do percurso que o peixe deve ultrapassar e as velocidades de natação características das espécies que devem ser atendidas, pode-se obter as velocidades que podem ocorrer na estrutura, para que a trajetória possa ser realizada sem exaustão dos indivíduos. Deve-se considerar que, geralmente, os peixes procuram os caminhos com as menores velocidades, como por exemplo, próximo a paredes e que regiões de recirculação podem ser utilizadas como zonas de descanso durante o percurso.

No entanto, as expressões apresentadas anteriormente devem ser verificadas antes de serem utilizadas no dimensionamento de MTP para peixes tropicais.

No Brasil, o estudo sobre a capacidade natatória dos peixes começou nos últimos anos. No estudo realizado por Santos (2004) foi proposta uma metodologia de medição de

velocidade crítica e de explosão das espécies migratórias brasileiras. Santos (2004) aplicou essa metodologia a espécie de peixe (*Pimelodus maculatus*).

A velocidade crítica avaliada por Santos (2004), é um tipo de velocidade prolongada, que foi definida por Brett (1964), dada pela equação (2.53). Para avaliar esta velocidade o peixe deveria ser submetido a um incremento de velocidade de escoamento (ΔU) sempre em certo período fixo de tempo (t_i). Os incrementos de velocidade ocorrem até a fadiga completa do peixe.

$$V_{cr} = V_{max} + \frac{t_f}{t_i} \cdot \Delta U \quad (2.53)$$

sendo U_{max} a velocidade máxima suportada pelo peixe, t_f o tempo que o peixe resiste até a fadiga dentro do último intervalo, t_i o intervalos fixos a que ocorrem os incrementos de velocidade (ΔU).

Vicentini (2005) implementou melhorias no aparato desenvolvido originalmente por Santos (2004) e seguiu com a avaliação da velocidade prolongada crítica e da velocidade prolongada da espécie *Pimelodus maculatus*. Os resultados desse autor apontaram na direção do trabalho de Santos (2004), mostrando a peculiaridade das capacidades de nado da ictiofauna em relação às espécies de clima temperado.

Outros estudos tem sido realizados no Brasil, com o intuito de obter dados sobre as características de nado de espécies tropicais. Viana (2005) realizou um estudo experimental para avaliar a velocidade crítica do *Astyanac bimaculatus* (lambari-do-rabo-amarelo). Santos (2007) avaliou experimentalmente a velocidade crítica e a velocidade de explosão de outras espécies de peixes presentes em rios brasileiros, conforme apresentado na Tabela 2.9.

Tabela 2.9– Resumo de velocidades características de peixes presentes em rios brasileiros.

| Espécie | V_{cr} | V_{max} (explosão) | Fonte: |
|---|---|-------------------------|---------------|
| <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi) | = 0,894 + 0,045.F _{cond} (m/s) F _{cond} = M/l Tempo = 5 minutos | | Santos (2004) |
| <i>Astyanac bimaculatus</i> (lambari-do-rabo-amarelo). | = 10,61 comprimentos/s Tempo = 5 minutos | | Viana (2005) |
| <i>Prochilodus costatus</i> (curimba) | = 1,78.l ^{0.3} Tempo = 5 minutos | 1,78 m/s (l = 29 cm) | Santos (2007) |
| <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi) | = 4,13.l ^{0.7} Tempo = 5 minutos | | Santos (2007) |
| <i>Leporinus reinhardtii</i> (piauí três-pintas) | = 3,12.l ^{0.5} Tempo = 5 minutos | 1,58 m/s (l = 16 cm) | Santos (2007) |

Sendo M a massa do peixe em (kg) e l o comprimento total do mesmo em (m).

São necessários estudos adicionais que possibilitem o conhecimento das características natatórias de outras espécies de peixes presentes nos rios brasileiros, contribuindo assim, para melhores critérios de projetos de escadas para peixes em rios nacionais.

2.7.5. Influência da Turbulência do Escoamento no Comportamento dos Peixes

Odeh *et al.* (2002) acreditam que as tensões de Reynolds possam representar de maneira adequada o efeito da turbulência sobre o corpo dos peixes. Os efeitos de tensões podem ser descritos como forças atuantes paralelamente ao corpo, e por isso, valores elevados, geralmente associam-se a danos na mucosa dos peixes.

Existe o interesse de projetos de turbinas que causem menores impactos aos peixes que venham a passar por elas. Os danos causados aos peixes, ao passarem por turbinas, geralmente devem-se a efeitos de pressão, cavitação, tensões e causas mecânicas. Alguns trabalhos avaliam as tensões a que os indivíduos estão sendo submetidos, como o trabalho realizado por Cada *et al.* (1997).

Turnpenny *et al.* (1992) apud Odeh *et al.* (2002) avaliaram diferentes espécies de peixes a tensões entre 206 e 3410 N/m². Os salmonídeos (*Atlantic salmon*, *rainbow trout* e *brown trout*) testados com os menores valores de tensões apresentaram pouca ou nenhuma perda de camada da mucosa e nenhum outro dano aparente, e não ocorreu mortalidade após sete dias a exposição única. O aumento das velocidades e das tensões aumentou os danos e diminuiu o tempo de sobrevivência. Para o máximo valor testado (3410 N/m²), observou-se perda da camada da mucosa e danos nos olhos, com sobrevivência após 7 dias de 90% dos indivíduos. Já os clupeídeos (peixes da família Clupeidae, como o *shad* e *herring*), mostraram-se bem mais sensíveis aos ensaios realizados e, mesmo para as tensões menores, morreram dentro de uma hora, sofrendo danos ou perda dos olhos, perda da mucosa, entre outros.

O tipo de tensões que o indivíduo está submetido ao passar por uma turbina é, geralmente, diferente do encontrado durante a passagem por uma escada para peixes ou mesmo pelo curso natural do rio. No entanto, é interessante que se possam avaliar essas tensões e a possível influência no comportamento dos peixes. O trabalho de Odeh *et al.* (2002) procurou verificar o efeito da turbulência no comportamento de peixes migratórios, através do estudo de três condições de turbulência a jusante de uma comporta. Esses pesquisadores avaliaram três espécies de peixes: *hybrid bass*, *rainbow trout* e *Atlantic salmon*.

Odeh *et al.* (2002) verificaram que a exposição a tensões de Reynolds médias superiores a 50 N/m^2 , por um período de 10 minutos, pode causar algum dano as espécies, mas não causa mortalidade significativa após 48 horas da exposição. Para valores superiores a 30 N/m^2 , Odeh *et al.* verificaram que não há alteração da resposta do “rainbow trout” a surpresas ou imprevistos (*startle response*), mas parece influenciar bastante os peixes juvenis dos tipos “Atlantic salmon” e “hybrid pass”, o que deve deixá-los suscetíveis aos predadores ou outros riscos. Os autores ainda verificaram que os peixes estavam recuperados dos efeitos da turbulência 24 horas depois dos ensaios.

Lupandin (2005) avaliou o efeito da turbulência do escoamento na velocidade de natação da espécie *Perca fluviatilis*, em indivíduos de diferentes tamanhos. Nesse estudo, verificou-se que a partir de um determinado valor de intensidade da turbulência (razão entre o desvio padrão da série temporal e a velocidade média) os peixes diminuem a velocidade de nado. Lupandin (2005) relata que a diminuição na capacidade natatória inicia quando a escada de turbulência, que descreve o tamanho do vórtice, excede $2/3$ do comprimento do peixe.

Observa-se, a partir de estudos onde se verifica a influência da turbulência do escoamento na capacidade natatória que, fluxos excessivamente turbulentos prejudicam o desempenho dos movimentos dos peixes. No entanto, alguns autores, entre eles Liao *et al.* (2003), verificaram que os peixes podem utilizar-se dos vórtices formados no escoamento para reduzir os “custos de locomoção”. Esses autores comentam que a compreensão da interação entre a atividade muscular dos peixes e a passagem através dos vórtices promete auxiliar nos projetos de escadas de peixe.

CAPÍTULO 3

3. Instalação Experimental e Metodologia

Este capítulo descreve as duas instalações experimentais utilizadas neste trabalho e a metodologia da realização dos ensaios. A Estrutura A está instalada no Pavilhão Marítimo do IPH/UFRGS e representa um modelo reduzido parcial da escada para peixes construída na UHE de Igarapava (Minas Gerais). A Estrutura B está construída no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Lisboa, Portugal, onde foram estudadas outras duas configurações de passagens para peixes.

3.1 Planejamento dos Experimentos

Antes de apresentar detalhadamente as estruturas utilizadas, as variáveis medidas e os métodos empregados na execução do trabalho, faz-se um breve resumo do planejamento dos experimentos, enfatizando o objetivo do presente trabalho.

Com o objetivo geral de avaliar características macroturbulentas do escoamento em Mecanismos de Transposição de Peixes (MTP) do tipo passagem por bacias sucessivas, elegeram-se três configurações de escadas para peixes. A Estrutura A, descrita no item 3.2, representa a continuidade de um estudo sobre a escada para peixes da UHE de Igarapava. A estrutura utilizada foi construída dentro de um projeto intitulado “Análise de Macroturbulência em Mecanismos de Transposição de Peixes através do Estudo de Variação Instantânea das Propriedades dos Escoamentos”, financiado pelo CNPq (CT-Hidro, nº. 55.0319/2002-6). Essa geometria também tem sido estudada por pesquisadores da UFMG e da USP através de medições em modelos e em protótipo. Este fato possibilita que os dados obtidos nesta pesquisa sejam relacionados com os resultados de outros pesquisadores, inclusive com alguns indicadores biológicos.

A segunda parte do trabalho foi realizada durante o período de estágio de doutoramento realizado em Portugal. Nessa fase utilizou-se uma estrutura (aqui denominada Estrutura B) que é um protótipo de uma passagem para peixes e faz parte do projeto “Desenvolvimento e aplicação de uma passagem para peixes destinada a obras transversais fluviais de utilização agrícola”, inserido no programa AGRO (INIAP 114), tendo sido desenvolvido entre 01 de Junho de 2002 e 01 de Junho de 2005. Nesse projeto participaram quatro entidades portuguesas: Instituto Superior de Agronomia (ISA) – (entidade proponente),

Instituto Superior Técnico (IST), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e Direção Geral dos Recursos Florestais (DGRF). Esse protótipo, descrito no item 3.3, permite a instalação de diferentes configurações geométricas dos defletores. Optou-se, para complementar os objetivos deste trabalho de tese, pela escolha de duas estruturas de escadas para peixes montadas na Estrutura B: uma com descarregador de superfície e outra com orifícios de fundo. Esses dois tipos foram escolhidos por representarem estruturas usualmente construídas para transposição de peixes. Este fato confirma-se em Portugal, onde foi realizado um levantamento de todas as estruturas de transposição de peixes (Santo, 2005) e também no Brasil, onde, que embora um estudo sistemático não tenha sido realizado, tem-se o conhecimento da existência de várias escadas para peixes com essas configurações, conforme foi apresentado por Martins (2005) ao ilustrar o panorama nacional de MTP. Como este trabalho segue, por pesquisadores portugueses, com a avaliação da ictiofauna, há a possibilidade de, futuramente, relacionar alguns dos resultados com o comportamento biológico.

Para a avaliação da macroturbulência do escoamento, as medições com o velocímetro acústico Doppler (ADV) são de principal interesse e esse tipo de equipamento foi utilizado nas três estruturas em análise. Para o controle adequado das condições de realização dos ensaios, foram efetuadas medições sistemáticas de profundidades ao longo do canal, em todos os estudos. Complementarmente, no modelo construído no IPH, foram realizadas outras avaliações através de medições de pressões junto ao fundo do tanque de controle e detalhamento da superfície livre neste mesmo tanque.

Salienta-se que as variações de configurações geométricas de passagens para peixes por bacias sucessivas são inúmeras e, nesta tese, não se tem a pretensão de esgotar o tema. Pretende-se avaliar as características macroturbulentas do escoamento nesses tipos de estruturas, que apesar de diferentes, apresentam em linhas gerais um mesmo princípio de funcionamento: tem-se um canal, onde são inseridas barreiras com o objetivo de dissipar a energia do escoamento, diminuindo as velocidades máximas e, geralmente, produzindo regiões de recirculação para o peixe poder descansar.

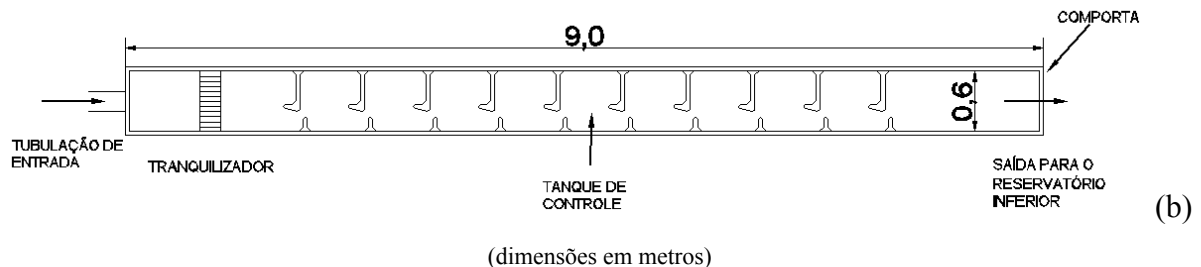
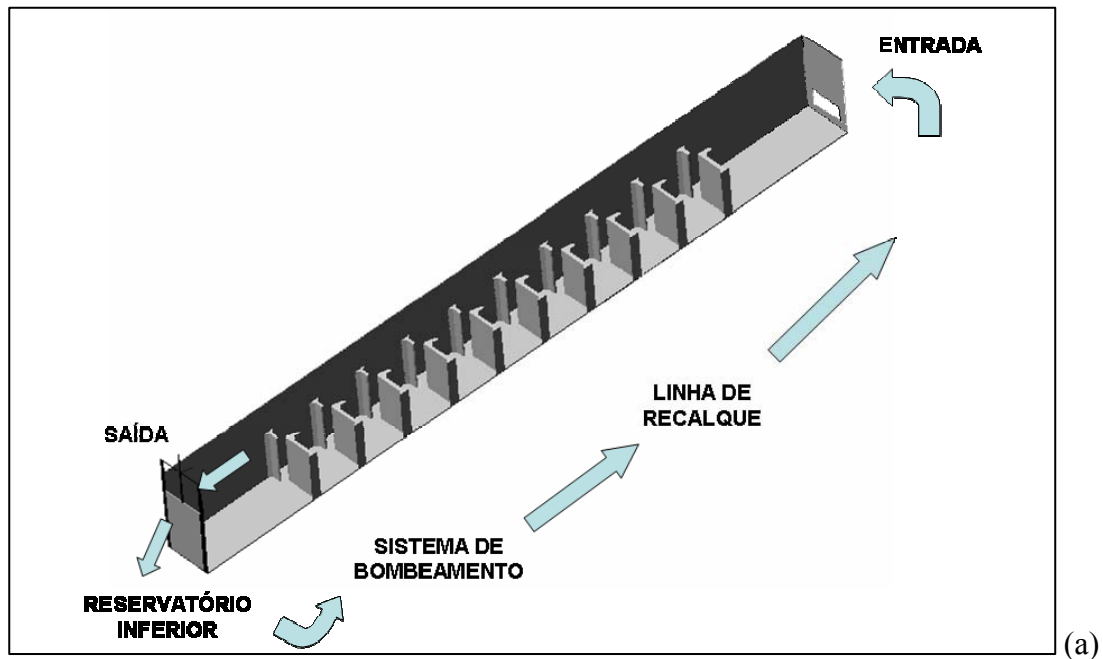
A seguir são detalhadas as características de cada sistema e os ensaios que foram realizados.

3.2 Estrutura A – IPH/UFRGS

3.2.1 Instalação Experimental A

A Estrutura A está construída no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e reproduz 9 tanques da escada para peixes da UHE de Igarapava na escala geométrica 1:5.

A estrutura do modelo, esquematizada na Figura 3.1 é composta por um canal com aproximadamente 9,0 m de comprimento e 0,60 m de largura, onde estão reproduzidos 9 tanques. Os tanques possuem declividade de fundo (S_0) igual a 6%, 0,60 m de largura (B) e 0,60 m de comprimento (L). A Figura 3.1c apresenta uma vista geral do sistema. A passagem da água entre os tanques consecutivos ocorre por uma ranhura vertical, com uma abertura (b_0) de 0,08 m entre um septo maior e outro menor (Figura 3.2).



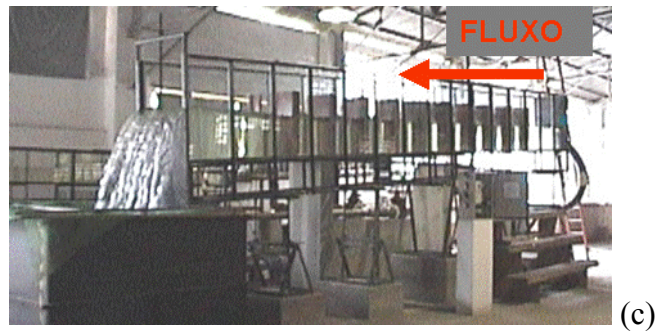


Figura 3.1 – Modelo físico utilizado neste estudo, representativo de parte da escada da UHE de Igarapava, denominado Estrutura A: (a) esquema geral do modelo (sem a lateral esquerda); (b) esquema em planta; (c) vista geral.

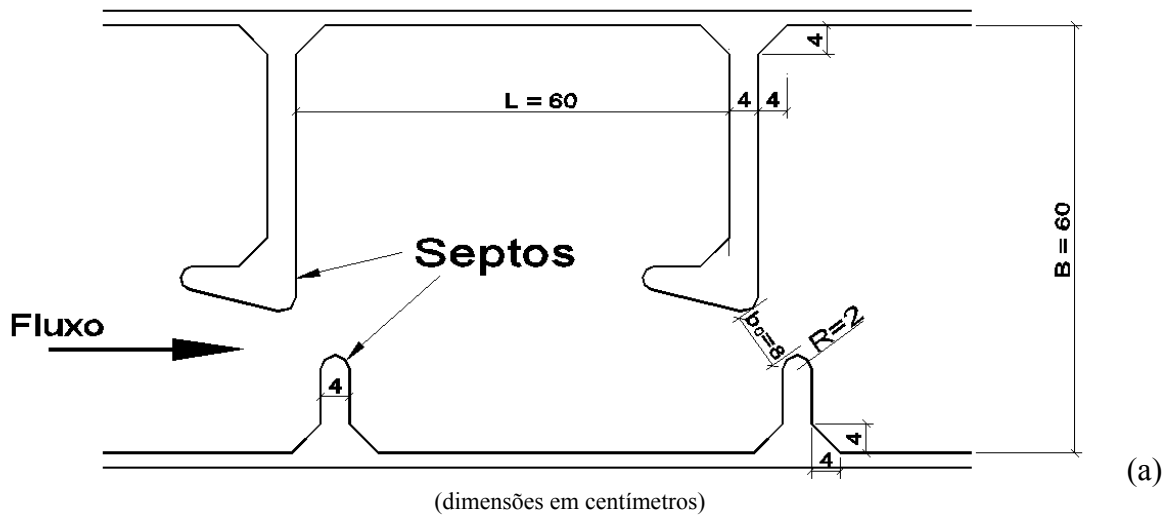


Figura 3.2 – (a) esquema em planta de um tanque do modelo com as principais dimensões; (b) vista do mesmo no modelo (as setas indicam o sentido do escoamento médio).

O canal é alimentado por uma tubulação que, com o auxílio de uma bomba (Figura 3.3a), leva água de um reservatório inferior até a entrada do canal (parte mais elevada). Desde

a parte de entrada da água no canal até o primeiro septo há uma distância de 2 m. Ao longo desse trecho há um tranqüilizador, com 0,20 m de comprimento, formado por tubos de PVC de 50 mm de diâmetro, dispostos em forma de colméia ao longo de toda seção transversal do canal. Desta maneira é obtido um fluxo com condições adequadas desde o primeiro tanque. Após o último septo, tem-se uma distância de 1,50 m até a comporta no final do canal, que verte água para o reservatório inferior. A comporta foi usada para regular o nível de jusante de modo a garantir vazão e lâmina d'água semelhantes às encontradas no protótipo no tanque de controle.

A bomba utilizada no modelo é da marca KSB, operada em conjunto com um inversor de frequência (marca WEG, série CFW-09, Figura 3.3b) e um medidor de vazão eletromagnético (Modelo 8732c da Emerson Process Management Ltda). O medidor de vazão eletromagnético (Figura 3.3c) fica instalado na tubulação de recalque de água para o modelo. Para cada condição de ensaio realizado mantém-se o controle do número de rotações do motor da bomba, a vazão e a profundidade média do escoamento (profundidade medida no meio do tanque, pela lateral do canal, usando uma escala graduada).

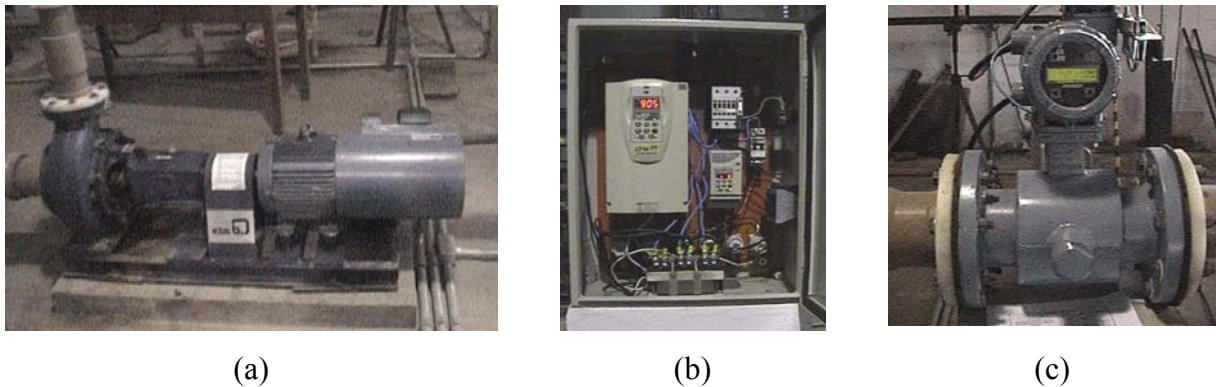


Figura 3.3 – (a) conjunto motor-bomba; (b) inversor de frequência; (c) medidor de vazão eletromagnético.

O modelo utilizado apresenta escala de redução geométrica de 1:5 em relação à escada para peixes da UHE de Igarapava, sendo um modelo parcial do protótipo e segue a lei de modelos de Froude, que correlaciona as forças gravitacionais e inerciais, preponderantes em escoamentos à superfície livre.

Neste trabalho são, também, utilizados para análises comparativas, dados obtidos em um modelo da mesma estrutura em escala 1:20, do estudo realizado por Coletti (2005) e dados obtidos em protótipo, conforme apresentado por Viana (2005). A Tabela 3.1 apresenta algumas características dos modelos e do protótipo.

Tabela 3.1– Resumo das características físicas dos modelos experimentais e do protótipo.

| Característica | Modelo | | Protótipo Viana (2005) |
|-----------------------------|-----------------|----------------|---------------------------|
| | Presente estudo | Coletti (2005) | |
| Escala | 1:5 | 1:20 | 1:1 |
| Declividade do canal (%) | 6 | 6 | 6 |
| Número de tanques | 9* | 26* | 187 |
| Largura dos tanques (m) | 0,60 | 0,15 | 3,00 |
| Comprimento dos tanques (m) | 0,60 | 0,15 | 3,00 |
| Abertura das ranhuras (m) | 0,08 | 0,02 | 0,40 |

*apenas um trecho da estrutura foi representado em laboratório.

3.2.2 Metodologia Experimental A

Na estrutura A foram realizadas medições da lâmina d'água, das pressões junto ao fundo de um tanque de controle e das velocidades nas três direções nesse mesmo tanque, para três vazões, de acordo com as condições de ensaio apresentadas na Tabela 3.2. A menor vazão considerada representa a condição dos resultados obtidos em protótipo por Viana (2005), e as outras duas descargas representam os valores mínimo e máximo de projeto.

Tabela 3.2 – Resumo das condições do escoamento nas medições realizadas na Estrutura A.

| Estrutura | Estrutura A – com ranhura vertical | | |
|------------------------------------|------------------------------------|---------|---------|
| Vazão (m ³ /s) | 0,02165 | 0,02451 | 0,02916 |
| Q* | 13,40 | 15,17 | 18,05 |
| h _m (m) | 0,380 | 0,398 | 0,470 |
| P _v (W/m ³) | 55,83 | 60,35 | 60,80 |
| Δh (m) | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Fr | 0,35 | 0,36 | 0,35 |

Onde:

Q* é a vazão adimensional definida pela equação (2.15);

h_m é a profundidade média no tanque, medida na parte central de cada tanque, na lateral do canal;

P_v é a potência dissipada por unidade de volume;

Δh é o desnível do escoamento entre tanques sucessivos, que no regime uniforme é igual ao desnível geométrico;

Fr é o número de Froude na ranhura, considerando o comprimento característico igual a profundidade média do escoamento.

3.2.2.1 Medição da profundidade do escoamento

A medição da profundidade do escoamento na superfície dos tanques foi realizada utilizando uma ponta linimétrica fixa em um carrinho de madeira móvel sobre o canal, que permite o posicionamento da mesma nos diferentes pontos de medição. A Figura 3.4 mostra a ponta linimétrica fixada no carrinho sobre o canal.

As características de ondulação da superfície livre do escoamento exigiram a utilização de um dispositivo auxiliar na definição da superfície d'água média. Foi utilizado junto à ponta linimétrica, um transistor para detectar a resistência da água, mesmo com baixa condutividade, e um LED (“light emitting diode”) como sinalizador. A medida da profundidade média do escoamento foi definida, visualmente, a partir do sinalizador mencionado. Considera-se como a medida de profundidade do escoamento, em cada ponto, aquela obtida na posição em que o sinalizador acende/apaga em intervalos regulares.



Figura 3.4 – Ponta linimétrica fixada ao carrinho móvel sobre o canal.

A profundidade do escoamento foi avaliada ao longo de todo canal, conforme pode ser observado na Figura 3.5, em um eixo longitudinal (A), passando pelas aberturas entre os tanques consecutivos e em eixos transversais que passam na seção transversal de cada tanque (Bi, com i variando de 1 até 9). Ao longo das retas A e Bi, a profundidade do escoamento foi medida a cada 5 cm em planta. O tanque central (5º tanque) foi definido como o tanque de controle onde as medições das profundidades foram realizadas em uma malha de pontos mais detalhada, a fim de definir o campo de profundidades médias de um tanque padrão.

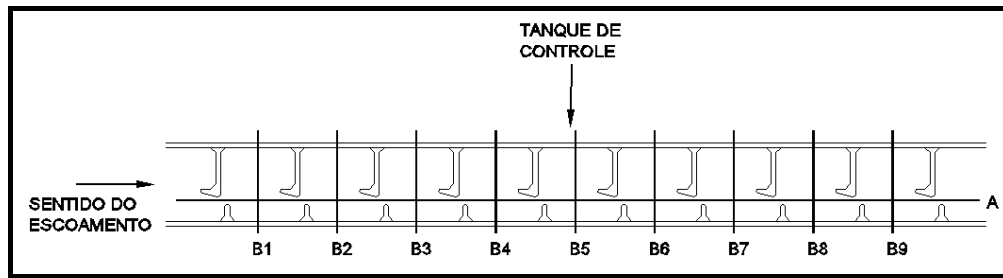


Figura 3.5 – Esquema dos planos de medição da profundidade do escoamento ao longo do modelo.

3.2.2.2. Medição de pressão

A medição da pressão no fundo do canal foi realizada através da utilização de transdutores elétricos piezoresistivos de pressão (Figura 3.6a), para valores instantâneos e piezômetros convencionais (Figura 3.6b) para verificação dos valores médios.

Os piezômetros foram construídos com tubos de vidro de 10 mm de diâmetro, ligados por meio de tubos flexíveis de PVC cristal (diâmetro interno = 1,5 mm; diâmetro externo = 3 mm) às tomadas de pressão localizadas no fundo do canal.

Os sensores de pressão utilizados neste trabalho apresentam as seguintes características: marca Hytronic, modelo TM25 com faixa de trabalho de 2 psi (~1400 mmca), distribuídos da seguinte maneira: -1,0 a 1,0 psi; -0,5 a 1,5 psi e -1,5 a 0,5 psi, com erro de fundo de escala igual a $\pm 0,25\%$ ($\pm 3,5$ mm.c.a.).

Todos os transdutores de pressão foram submetidos, periodicamente, a um processo de calibração estática, relacionando medições de tensão (Volts) a diversas alturas de colunas de água (P/γ). Um transdutor elétrico de pressão é um aparelho que mede indiretamente a pressão através da deformação de uma membrana interna. No sistema empregado, essa deformação é transformada em impulso elétrico que é recebido por uma placa de aquisição de dados e, posteriormente, enviados para armazenamento e análise em um microcomputador.

A placa de aquisição de dados utilizada é do tipo CAD12/32, marca Lynx, com 32 canais de entrada para conversão do sinal analógico em digital, com resolução de 12 bits (4096 níveis). O sistema de conexões entre os componentes foi desenvolvido na UFRGS - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) / Setor de Instrumentação, e sua esquematização básica pode ser vista na Figura 3.7.

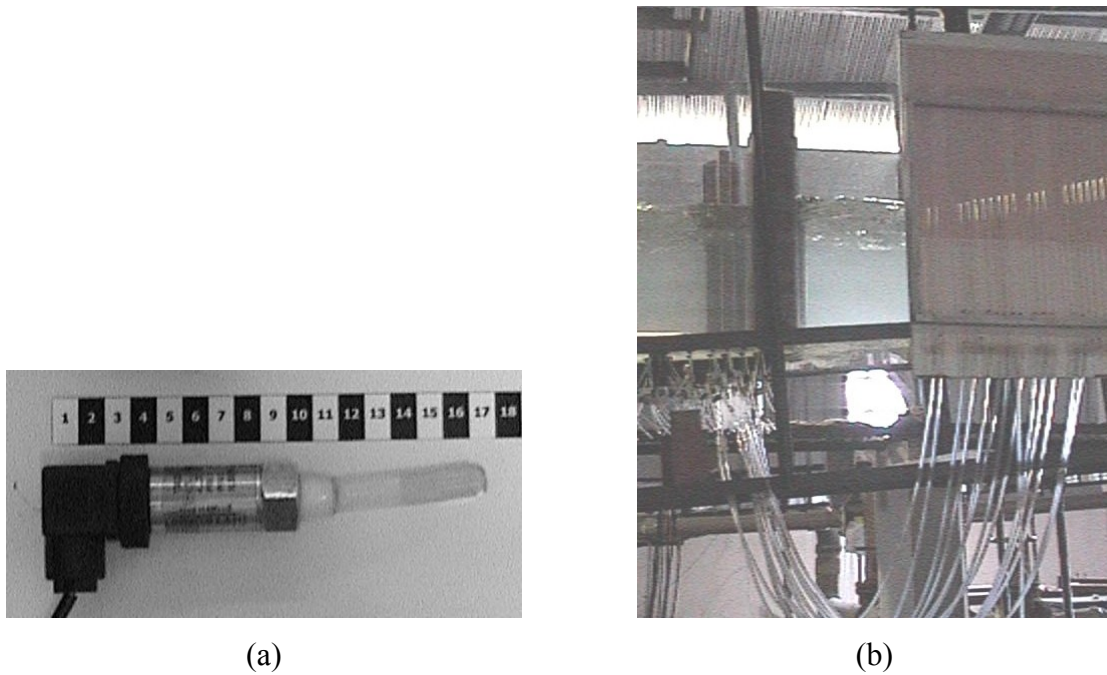


Figura 3.6 – Instrumentos de medição de pressão: (a) transdutor de pressão - sensores piezoresistivos (escala em cm); (b) quadro de piezômetros.

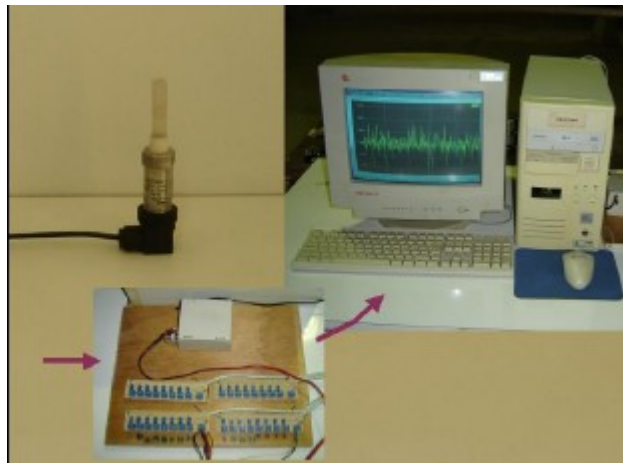


Figura 3.7 – Esquema do sistema de aquisição de dados de pressão utilizando sensores piezoresistivos. Fonte: Coletti (2005).

A localização das tomadas para a medição de pressão instantânea é apresentada na Figura 3.8, totalizando 175 pontos. Os ensaios de medição de pressão instantânea foram realizados a uma frequência de aquisição de 50 Hz, com duração de 360 segundos, totalizando 18.000 valores de pressão instantânea para cada tomada de medição. Os ensaios foram realizados em várias campanhas, com a utilização de no máximo 10 sensores simultaneamente, instalados em tomadas de uma mesma linha ou coluna do tanque de medição, de acordo com a Figura 3.8.

A instalação do sensor de pressão diretamente nas estruturas usualmente empregadas em investigações deste tipo dificilmente é possível e, por este motivo, geralmente, são utilizados condutos flexíveis que conectam a tomada de pressão ao instrumento. No entanto, existem limites no comprimento desta conexão a fim de que o sinal medido não sofra alterações significativas e possa ser considerado representativo do fenômeno. Lopardo (1986) recomenda o comprimento máximo de 0,50 m da conexão para medições realizadas em dissipadores de energia por ressalto hidráulico. Neste trabalho realizou-se uma avaliação comparativa da influência do comprimento do conduto flexível nos resultados. Essa avaliação é apresentada no Anexo 3. Optou-se pela conexão das tomadas de pressão ao sensor através de um conduto flexível de “nylon”, de 1,5 mm de diâmetro interno e com 0,20 m de comprimento, que é o comprimento suficiente para manuseio dos transdutores, mantendo a qualidade dos sinais obtidos.

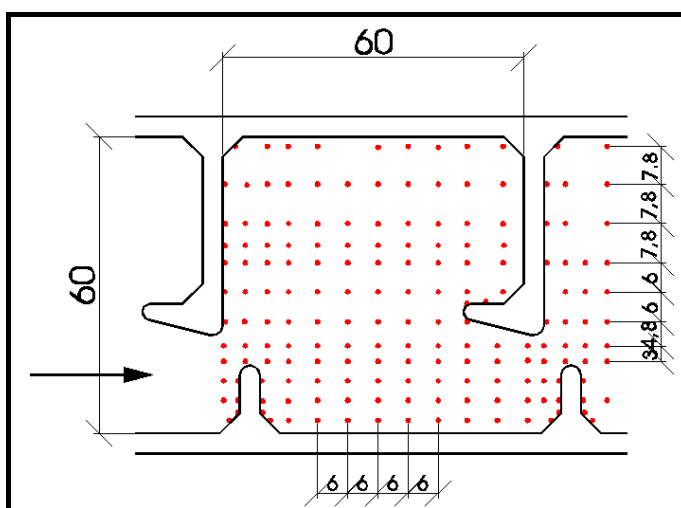


Figura 3.8 – Localização das tomadas de medição de pressão no tanque de controle (medidas em cm).

3.2.2.3 Medição de velocidade

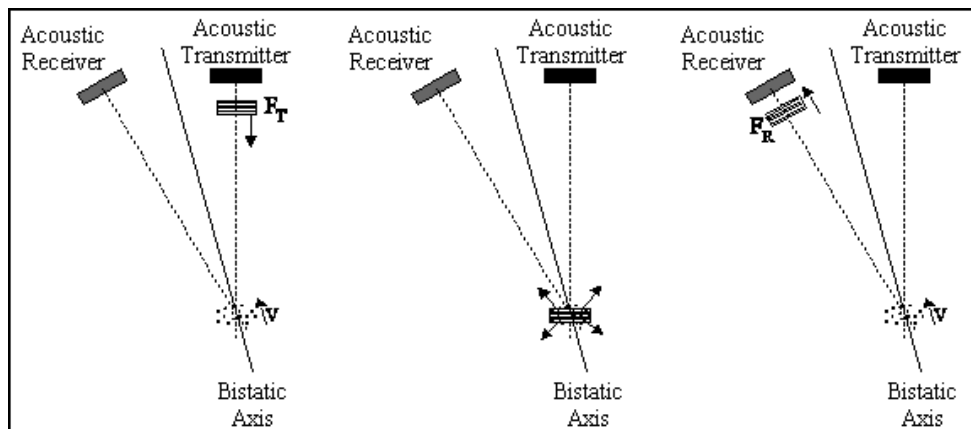
As medições de velocidade foram realizadas com um velocímetro acústico Doppler (ADV) da marca Sontek. Esse equipamento foi escolhido por permitir a avaliação da velocidade do escoamento nos três eixos cartesianos de forma relativamente fácil. O ADV é calibrado durante a fabricação e dispensa a realização de aferições periódicas, pelo menos enquanto não houver dano à sua integridade física.

O ADV mede a velocidade das partículas presentes na água através do princípio do efeito Doppler. Segundo este princípio, se uma fonte de som está se deslocando em relação a um receptor, a frequência do som percebida pelo receptor é deslocada em relação à frequência transmitida (Sontek, 2001). Esta relação de frequências pode ser definida pela equação:

$$F_{doppler} = -F_{fonte} (V / V_{som}) \quad (3.1)$$

onde: $F_{doppler}$ é o deslocamento na frequência recebida, F_{fonte} é a frequência do som transmitido, V é a velocidade da fonte em relação ao receptor e V_{som} é a velocidade do som. Assim, se a distância entre o receptor e o transmissor diminui, a frequência recebida aumenta e vice-versa.

O ADV utiliza transdutores acústicos receptores e transmissores, ambos construídos de modo a operar em feixes estreitos. A medição de velocidade ocorre em um volume de água onde os feixes dos transdutores se encontram. O transmissor gera um pequeno pulso de som de frequência conhecida, que se propaga na água ao longo do eixo desse feixe. Como o pulso passa pelo volume de medição, a energia acústica é refletida em todas as direções pelas pequenas partículas presentes na água. Parte da energia refletida volta através do eixo receptor, onde é feita a medição da mudança da frequência pelo ADV. Esse deslocamento na frequência medido pelo receptor é proporcional à velocidade das partículas na direção do eixo bi-estático (bissetriz do ângulo formado pelo transdutor transmissor - volume de medição - transdutor receptor). A Figura 3.9 mostra um esquema desse processo.



Obs: F_T é a frequência transmitida (da fonte) e F_R é a frequência recebida, dada por $F_R = F_{fonte} + F_{doppler}$

Figura 3.9 – Esquema do princípio de funcionamento do ADV. Adaptado de Sontek (2001).

Em geral, esse tipo de equipamento possui um transdutor transmissor e 2 ou 3 receptores. Os receptores são posicionados de modo que a intersecção com o feixe gerado pelo transmissor ocorra em um mesmo volume. O equipamento utilizado neste trabalho possui 3 transdutores receptores, que possibilitam a medição da velocidade tridimensional.

O ADV é construído para medir velocidades com uma resposta muito rápida. O equipamento realiza de 150 a 250 medições por segundo (chamadas pelo fabricante de

“pings”³). A quantidade de “pings” por segundo não pode ser alterada pelo usuário, sendo inerente ao processo. Cada um desses valores individuais incorpora ao resultado uma elevada quantidade de ruído elétrico. Os dados são gravados de acordo com a frequência de amostragem do sinal, escolhida pelo operador, que varia, no equipamento utilizado, de 0,1 Hz até 50 Hz. Então, ao reduzir a frequência de amostragem, tem-se a diminuição do ruído, já que cada medição resulta de uma média feita com um maior número de “pings”. (Sontek, 2001).

O sistema de medição Doppler apresenta um ruído que é inerente ao processo. O ruído Doppler apresenta características aleatórias e pode-se assumir que segue uma distribuição normal. Sontek (2001) estima que em boas condições de operação (SNR > 15dB e correlação > 70%), o ruído da velocidade horizontal é igual a 1% da faixa de velocidade, para frequências de amostragem de 25 Hz. O ruído presente na componente vertical de velocidade é, aproximadamente, quatro vezes menor que o horizontal (Sontek, 2001). O ruído diminui na proporção da raiz quadrada do número de “pings” utilizados para cada registro, ou seja, o ruído diminui para menores frequências de amostragem.

Durante a realização dos ensaios, o programa de aquisição de dados fornece dois parâmetros do sinal: o coeficiente de correlação e a relação sinal-ruído (SNR – “signal-to-noise ratio”). Esses parâmetros podem ser utilizados para monitorar a qualidade dos dados durante a aquisição e na fase de pós-processamento.

Segundo os fabricantes, os valores desejáveis de correlação variam entre 70% e 100%. No entanto, escoamentos com certas características, como turbulência e aeração elevadas, não possibilitam alcançar esses níveis, o que significa que os dados registrados terão uma quantidade maior de ruído. No entanto, mesmo com valores baixos de correlação (a partir de 30%) pode-se avaliar com qualidade valores de velocidades médias.

A relação sinal/ruído é medida em decibel (dB) e corresponde à diferença entre o nível do sinal recebido e o nível de ruído inerente ao processo de transmissão da informação. O SNR indica, principalmente, se há quantidade suficiente de partículas suspensas na água. Se existirem poucas partículas na água, o ruído eletrônico do ambiente pode ser maior que os níveis do sinal de retorno das partículas, e essas medições estarão comprometidas. Para uma frequência de amostragem de 25 Hz, Sontek (2001) recomenda que o valor de SNR seja de pelo menos 15 dB.

Nesse equipamento a medição do vetor velocidade ocorre nas suas três componentes cartesianas, em um volume localizado a, aproximadamente, 5 cm da sonda emissora e com

³ Ping pode ser traduzido como uma espécie de som agudo e prolongado.

uma frequência máxima de aquisição de 50 Um parâmetro que deve ser definido, pelo usuário, para a utilização do ADV é a faixa de velocidade. O ideal é a utilização da menor faixa de velocidade que seja capaz de medir o máximo valor esperado em determinado experimento, isso porque à medida que se aumenta a faixa de medição, também se aumentam os níveis de ruído no sinal.

A partir de ensaios preliminares verificou-se que, para os ensaios no modelo da escada para peixes com ranhura vertical, a faixa nominal de ± 250 cm/s, que corresponde a uma máxima componente horizontal de ± 360 cm/s e a uma máxima vertical de ± 90 cm/s, é a mais adequada. A frequência de amostragem é de 50 Hz, com aquisições de 90 s em cada posição, totalizando 4500 dados por ponto.

Realizaram-se ensaios de medição de velocidade com três vazões em escoamento pelo canal: a vazão mínima e a vazão máxima correspondentes do projeto da escada para peixes da UHE de Igarapava e uma vazão (menor que a mínima de projeto), que corresponde à descarga em que Viana (2005) realizou medições no protótipo. As medições de velocidade foram realizadas em uma malha tridimensional, no tanque central do canal, utilizado como tanque de controle, sendo que o escoamento ali verificado é considerado representativo dos demais tanques. Realizaram-se medições de velocidades em 5 planos paralelos ao fundo do canal, um deles próximo ao fundo (1 cm do fundo), e os outros afastados do fundo 10%, 25%, 50% e 80% da profundidade média do escoamento (h_m), de acordo com a Tabela 3.2. Em cada um desses planos realizaram-se, no mínimo, medições em 130 pontos (Figura 3.10), totalizando 700 pontos de medição no tanque, para cada descarga. Um estudo complementar foi realizado na região da ranhura vertical, sendo esta uma região crítica na passagem dos peixes e, provavelmente, onde ocorre a velocidade máxima. A Figura 3.10 mostra o detalhe em planta da região da ranhura, sendo que ali foram medidas velocidades nas seguintes profundidades (a partir do fundo): 1 cm, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% da profundidade média do escoamento. A aquisição dos dados foi realizada utilizando o programa HorizonADV, recomendado pelo fabricante do ADV (HorizonADV, 2005). Durante a realização dos ensaios, foi medida a temperatura da água, sendo esta informada no programa de aquisição de dados. A salinidade não foi medida, sendo considerada igual a zero para todos os ensaios realizados. O erro na avaliação do valor de velocidade, pela falta do monitoramento da salinidade da água, pode ser considerado desprezível (conforme pode ser verificado no Anexo 2, na Figura A2.1).

A escolha do equipamento para a realização das medições de velocidade levou a uma pesquisa bibliográfica no sentido de identificar outros trabalhos que avaliaram parâmetros turbulentos a partir de dados obtidos com o ADV. Observa-se que o equipamento deve ser

utilizado com restrições em situações de fluxos turbulentos e escoamentos aerados. No Anexo 2 apresenta-se um estudo realizado antes e durante os ensaios, para definir os parâmetros de realização das medições, como frequência de amostragem e duração, e também uma avaliação dos possíveis métodos a serem utilizados no pré-processamento, através da aplicação de determinados filtros, com o objetivo de diminuir os níveis de ruído presentes no sinal.

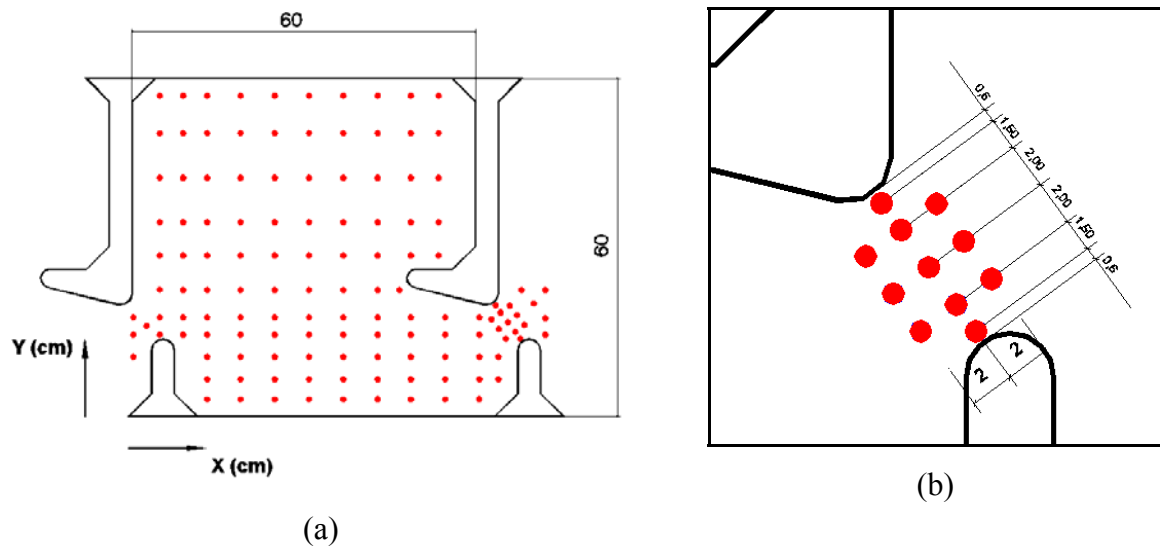


Figura 3.10 – (a) pontos de medição de velocidade em um dos planos paralelos ao fundo; (b) detalhe dos pontos de medição de velocidade na ranhura (medidas em cm).

Para o posicionamento do equipamento no interior do tanque de medição construiu-se um carrinho móvel sobre o canal que permite que o ADV seja deslocado horizontalmente (longitudinal e transversalmente) e verticalmente e que este fique fixo em determinada posição. A Figura 3.11 mostra o carrinho posicionado sobre o canal.



Figura 3.11 – Carrinho móvel sobre o canal para fixação do ADV nos pontos de medição.

3.3 Estrutura B – LNEC/IST-UTL

3.3.1 Instalação Experimental B

A Estrutura B está construída no pavilhão de ensaios do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa/Portugal.

Essa estrutura pode ser considerada como um protótipo de uma passagem para peixes por bacias sucessivas, constituído por um canal de, aproximadamente, 10 m de comprimento e 1 m de largura, com declividade que pode ser variada entre 0 e 17,5% (Figura 3.12). A montante desse canal encontra-se um tanque com, aproximadamente, 4 m³, e a jusante, um tanque maior, com área de 12 m² e aproximadamente 4 m de altura.

O canal permite o ajuste dos seus defletores, sendo possível reproduzir diversas configurações de passagens para peixes por bacias sucessivas. O canal pode compreender no máximo 10 bacias de comprimento de 1,00 m, divididas por septos delgados dotados de descarregadores de superfície (largura máxima 0,30 m) e/ou de orifícios de fundos (área máxima de 0,09 m²), cujas dimensões e formas são reguláveis. As paredes laterais do canal são de vidro transparente, possibilitando a visualização do escoamento.

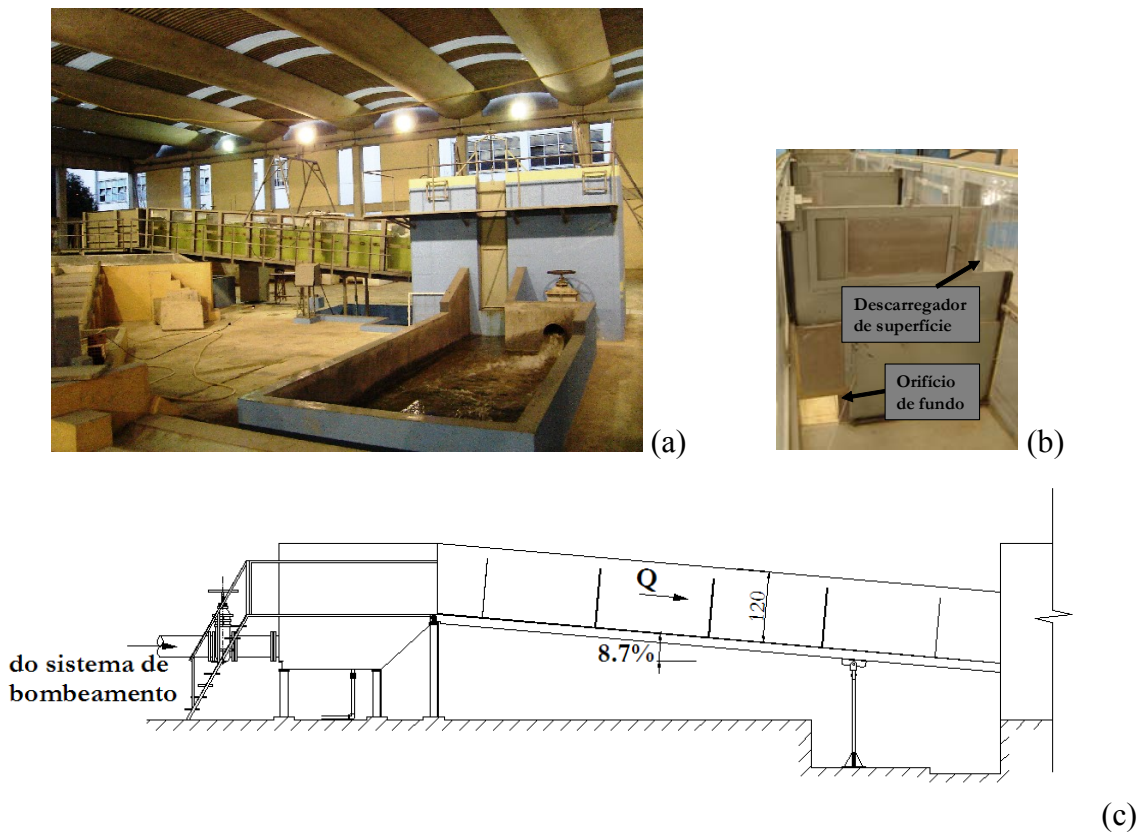


Figura 3.12 – Estrutura B: (a) vista geral da estrutura; (b) detalhe do septo com a possibilidade de abertura regulável de descarregador de superfície e orifício de fundo; (c) esquema geral da estrutura (medidas em cm).

O protótipo disponível no LNEC apresenta características que permitem a análise da influência de uma série de variáveis no escoamento de passagens para peixes. A seguir descreve-se cada uma dessas variáveis e as escolhas feitas neste trabalho:

- largura do canal: o canal apresenta 1,00 m de largura e é uma característica fixa da estrutura;

- comprimento dos tanques: o canal apresenta um comprimento total de 10 m, e a previsão máxima seria a instalação de 9 septos, formando 10 tanques. Nos ensaios conduzidos por pesquisadores portugueses (dentro do projeto mencionado anteriormente), foram instalados septos distanciados de, aproximadamente, 1,90 m, formando 6 tanques, sendo os 4 centrais idênticos. Optou-se por manter essa configuração com o objetivo de comparar, futuramente, as características turbulentas do escoamento com o comportamento dos peixes (estudo em andamento em Portugal).

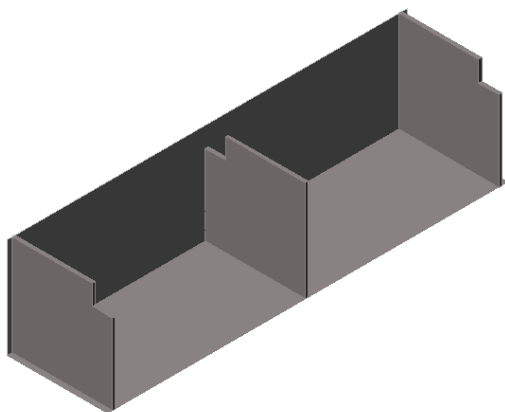
- declividade do canal: a declividade do canal pode variar de 0 até 17,5%. As passagens para peixes do tipo bacias sucessivas normalmente apresentam declividades entre 5% e 12%. Os ensaios realizados durante o projeto citado anteriormente, foram conduzidos com declividade de 8,7%. Optou-se por realizar estes ensaios com a mesma declividade, com o objetivo de comparar com os demais resultados obtidos dentro deste projeto.

- tipo de septo entre tanques sucessivos (Figura 3.12b): os septos presentes na estrutura apresentam a possibilidade do ajuste da abertura de um orifício junto ao fundo (de dimensões máximas 0,30x0,30 m) e um descarregador de superfície (abertura máxima de 0,30 m). Nos ensaios conduzidos no projeto citado anteriormente, foram instalados os septos com aberturas dos orifícios e descarregadores de superfície operando simultaneamente e em uma configuração ziguezague (conforme denominado por Kim, 2001), onde as aberturas são posicionadas em lados alternados em defletores consecutivos. Os ensaios realizados durante o estágio de doutoramento mantiveram a configuração ziguezague, no entanto, estudou-se isoladamente a passagem para peixes com descarregadores de superfície e com descarregadores de fundo. Essa escolha baseou-se na idéia de buscar, inicialmente, a compreensão do funcionamento de uma estrutura mais simples.

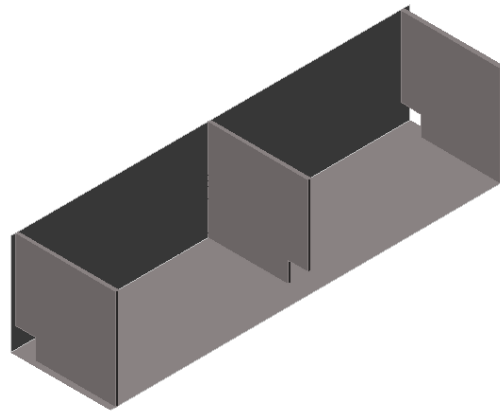
- tamanho das aberturas: optou-se pelo estudo do orifício com a abertura de 0,20x0,20 m² (embora houvesse possibilidade de abertura de até 0,30x0,30 m²), e o descarregador de superfície com abertura de 0,20 m.

Resumindo, na estrutura B foram avaliadas duas configurações geométricas de passagens para peixes, mantendo constantes a largura (1,00 m), o comprimento do tanque (1,90 m) e a declividade do canal (8,7%), sendo variáveis os defletores entre os tanques. A

Estrutura B1 apresenta descarregadores de superfície com abertura de 0,20 m, com soleira situada a 0,80 m do fundo do canal, e a Estrutura B2 apresenta orifícios de fundo de 0,20 x 0,20 m². Nas duas configurações, as aberturas encontram-se junto às paredes laterais, em posições alternadas em septos consecutivos (configuração ziguezague). A Figura 3.13 mostra esquematicamente essas duas geometrias.



Esquema da Estrutura B1 – com descarregadores de superfície instalados em lados alternados.



Esquema da Estrutura B2 – com orifícios de fundo instalados em lados alternados.



Detalhe do defletor com descarregador de superfície aberto.

(a)



Detalhe do defletor com o orifício de fundo aberto.

(b)

Figura 3.13 – Esquema da configuração geométrica dos tanques: (a) estrutura B1 - com descarregador de superfície; (b) estrutura B2 - com orifício de fundo.

A alimentação da estrutura ocorre através do sistema de bombeamento de um dos condutos do pavilhão de ensaios do NRE do LNEC. Nesse conduto há um medidor eletromagnético de vazão que pode alimentar outras estruturas, além da passagem para peixes. Durante os ensaios, a vazão deve ser constante, por isso teve-se o cuidado de operar o modelo isoladamente. O controle da entrada de água no sistema se dá por um controle remoto (Figura 3.14a), que permite quantificar a descarga e também alterar este valor. Os níveis de água no

canal são ajustados a partir de um registro localizado na saída do tanque a jusante (Figura 3.14b), bem como o estabelecimento do regime permanente, garantindo que o fluxo de entrada se iguale ao fluxo de saída.

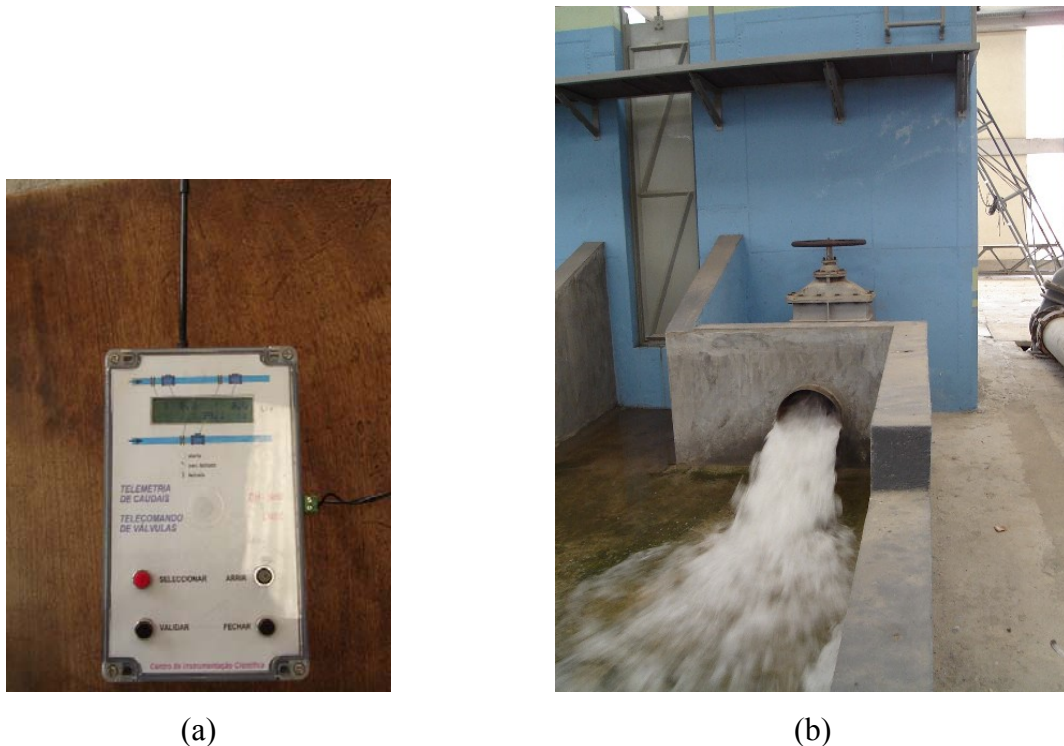


Figura 3.14 – (a) controlador da vazão que entra no sistema; (b) registro manual de controle da vazão que sai do sistema.

3.3.2 Ensaios Realizados

Na estrutura B foram realizadas medições da altura da lâmina d'água junto às laterais do canal e das velocidades nas três direções em um tanque de controle, em duas configurações geométricas de escadas para peixes. Em cada estrutura foram avaliadas três vazões, de acordo com as condições de ensaio apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resumo das condições do escoamento nas medições realizadas na Estrutura B (Figura 3.16a).

| Estrutura | Estrutura B1 – com descarregador de superfície | | | Estrutura B2 – com orifício de fundo | | |
|------------------------------------|--|--------|--------|--------------------------------------|--------|--------|
| | | | | | | |
| Vazão (m ³ /s) | 0,0368 | 0,0410 | 0,0456 | 0,0365 | 0,0403 | 0,0456 |
| h _m (m) | 0,96 | 0,99 | 1,01 | 0,65 | 0,79 | 1,00 |
| P _V (W/m ³) | 33,3 | 36,0 | 39,2 | 36,9 | 41,6 | 45,6 |
| Δh (m) | 0,0165 | 0,0165 | 0,0165 | 0,0125 | 0,0155 | 0,0190 |

Onde:

h_m é a profundidade média no tanque, medida na parte central de cada tanque, na lateral do canal;

P_v é potência dissipada por unidade de volume;

Δh é o desnível do escoamento entre tanques sucessivos, que no regime uniforme é igual ao desnível geométrico.

3.3.3 Metodologia Experimental B

3.3.3.1 Medição da lâmina d'água

As medições da profundidade do escoamento foram realizadas, principalmente, com fins de controle das condições características dos ensaios e para a avaliação de parâmetros hidráulicos como o coeficiente de descarga. Junto às paredes laterais do canal foram instaladas réguas graduadas, em pontos estratégicos: no centro de cada tanque, junto aos defletores e na entrada e saída do canal. No caso da presença de descarregador de superfície, a medição das profundidades do escoamento realizou-se ao longo de todo o delineamento do perfil da linha d'água (Figura 3.15).

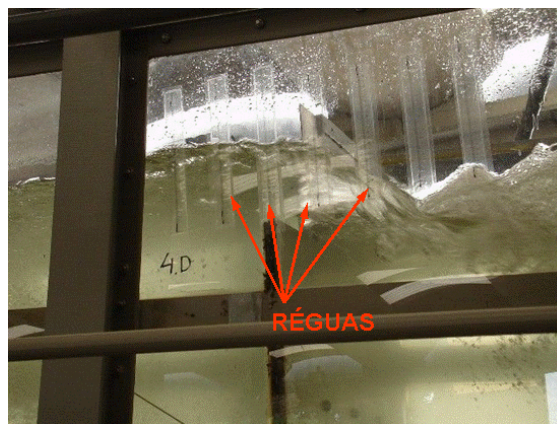


Figura 3.15 – Réguas graduadas na lateral da região do descarregador de superfície.

3.3.3.2 Medição de velocidade

As medições de velocidade foram realizadas com um velocímetro da marca Nortek, o NDV (Nortek Doppler Velocimeter), usualmente denominado ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). Esse equipamento apresenta características de funcionamento semelhantes ao descrito no item 3.2.2.3, da marca Sontek. Nesse equipamento a medição do vetor velocidade também ocorre nas suas três componentes cartesianas, em um volume localizado a, aproximadamente, 5 cm da sonda emissora, no entanto, a frequência máxima de aquisição é

25 Hz. No NDV, além da escolha da faixa de velocidade, deve-se também optar pelo tamanho do volume de medição, opção que não é disponível no equipamento da marca Sontek. A aquisição dos dados do NDV é realizada através do programa CollectV (CollectV, 2000). Antes da realização dos ensaios foram feitos alguns testes a fim de definir a melhor configuração dos parâmetros do equipamento. Uma análise desses testes é apresentada no Anexo 2.

A faixa de velocidade nominal escolhida foi de ± 250 cm/s, que corresponde a uma máxima componente horizontal de ± 360 cm/s e uma máxima vertical de ± 90 cm/s. Optou-se pelo volume padrão de medição do vetor velocidade, que é um cubo com 9 mm de aresta, como recomendado pelo fabricante. A frequência de amostragem é de 25 Hz, com aquisições de 90 s em cada posição, totalizando 2250 dados por ponto.

Para cada uma das configurações geométricas realizaram-se ensaios com três vazões, que possibilitam uma caracterização hidráulica satisfatória do escoamento nesse tipo de estrutura. As medições de velocidade foram realizadas em uma malha tridimensional, em um dos tanques do canal (3º tanque de jusante para montante), sendo que o escoamento pode ser considerado representativo dos demais tanques. Foram avaliadas as velocidades em 5 planos paralelos ao fundo do canal, um deles próximo ao fundo (1 cm do fundo), e os outros afastados do fundo 10, 25, 50 e 80% da profundidade média do escoamento (Figura 3.16a), de acordo com a Tabela 3.3. Em cada um desses planos, realizaram-se, no mínimo, medições em 40 pontos (Figura 3.16b), totalizando 200 pontos de medição no tanque, para cada descarga. Para a estrutura com descarregador de superfície, foi dada atenção especial à região de passagem da água entre tanques, já que esta é uma zona crítica onde, provavelmente, ocorre a velocidade máxima. A Figura 3.17 mostra a região do descarregador de superfície e a malha de pontos de medição. No total foram realizadas medições em 89 posições, para cada vazão, na região do entorno do descarregador de superfície.

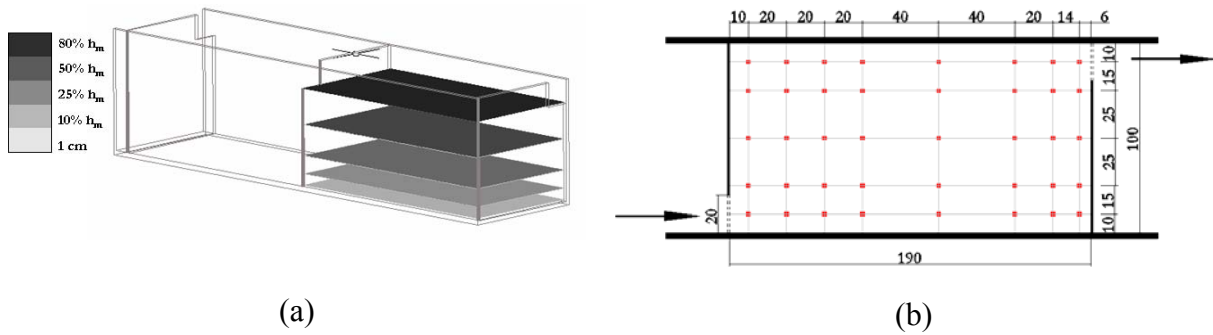
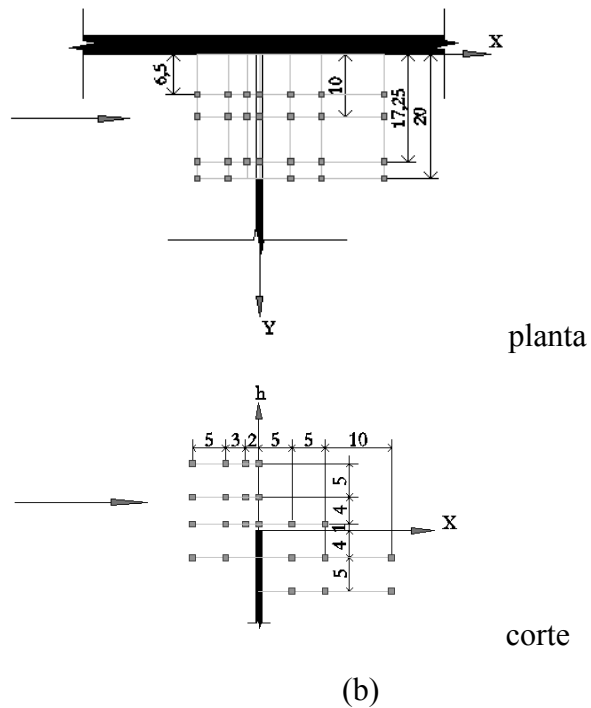


Figura 3.16 – Esquema dos pontos de medição de velocidades nos modelos das passagens para peixes por descarregador de superfície e orifício de fundo: (a) representação dos planos de medição de velocidades paralelos ao fundo (h_m é a profundidade média no tanque); (b) malha de medição de velocidade em cada um dos planos (dimensões em cm).



(a)



(b)

Figura 3.17 – Detalhe das medições realizadas na região do descarregador: (a) vista da região; (b) malha de medição de velocidades (dimensões em cm).

O ADV foi preso ao canal através de um carrinho móvel (Figura 3.18), que permite o posicionamento do equipamento e deslocamento do mesmo em todas as direções.



Figura 3.18 – Carrinho móvel sobre o canal onde é preso o ADV.

Deve-se ter cuidado ao realizar medições de velocidade próximas às fronteiras. Para as medições realizadas próximas ao fundo, Sontek (2001) recomenda que o centro do volume de medição encontre-se a, pelo menos, 2 cm do fundo. Neste trabalho foram realizadas medições em situações com a distância do fundo ao centro do volume de medição de 1 cm. No Anexo 2 comenta-se sobre a influência desse fator na avaliação das velocidades médias e dos parâmetros turbulentos.

CAPÍTULO 4

4 Resultados e Discussão

4.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os principais resultados obtidos no trabalho experimental, conforme descrito no Capítulo 3, em conjunto com uma análise crítica dos mesmos. Para facilitar a compreensão do leitor, os resultados são apresentados separadamente para cada geometria estudada.

A Tabela 4.1 procura sintetizar os ensaios realizados e os tipos de informações obtidas em cada estrutura.

Em geral, os estudos hidráulicos em escadas para peixes são realizados em condições de escoamento designado como “uniforme” ao longo do canal. O termo “uniforme”, neste caso, define o tipo de escoamento que possui características de velocidades e profundidades constantes em posições análogas dos tanques ao longo do canal, e, conseqüentemente, tem-se que as perdas de carga estão igualmente distribuídas na estrutura.

No entanto, de um modo geral, o escoamento “uniforme” ocorre nos tanques centrais de escadas para peixes. A região de entrada e saída da estrutura, na maioria das situações, apresenta, em analogia a nomenclatura utilizada em canais, características de escoamento gradualmente variado. Rajaratnam *et al.* (1986) realizaram a maioria dos seus ensaios em escoamento “uniforme”, mas os autores comentam sobre a observação, em algumas situações, de regime não-uniforme, com a formação de perfis da linha d’água típicos de remanso do tipo M1 e M2.

Nos ensaios no modelo de escada para peixes do tipo ranhura vertical, procurou-se ajustar no tanque de controle (tanque central) a profundidade média do escoamento correspondente ao escoamento “uniforme” para cada vazão, de acordo com o projeto da escada da UHE de Igarapava. Como já comentado no Capítulo 3, o ajuste da vazão é controlado através do uso de um inversor de frequência e de um medidor eletromagnético de vazão. Para ajustar a profundidade média do escoamento no tanque de controle utiliza-se a comporta de jusante. Devido ao comprimento limitado do canal (aproximadamente 10 m, 9 tanques) e a efeitos de remanso, não ocorre o estabelecimento do regime “uniforme”, mas assegura-se a profundidade média adequada para cada vazão no tanque de medição e o regime permanente do escoamento.

Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios realizados.

| Item avaliado / medido | Estrutura A - Ranhura vertical | | Estrutura B1 - Descarregador | | Estrutura B2 - Orifício | |
|--|---|--|---|--|---|---|
| | Q (m³/s) | Observações | Q (m³/s) | Observações | Q (m³/s) | Observações |
| Medição de níveis hm e Δh ao longo de todo o canal | 0,02165 | | Várias vazões entre 0,0090 e 0,0469 | | Várias vazões entre 0,0365 e 0,0456 | |
| | 0,02451 | | | | | |
| | 0,02916 | | | | | |
| Medição de nível detalhado no tanque de controle | 0,02165 | | X | | X | |
| | 0,02916 | | | | | |
| Velocidades | 0,02165 | 5 planos // fundo ≈ 700 pontos / vazão (estudo detalhado na ranhura, com medições em 10 profundidades) | 0,03680 | 5 planos // fundo ≈ 200 pontos / vazão (estudo detalhado na região do descarregador) | 0,03650 | 5 planos // fundo ≈ 200 pontos / vazão |
| | 0,02451 | | 0,04100 | | 0,04030 | |
| | 0,02916 | | 0,04560 | | 0,04560 | |
| Pressão no fundo do tanque de controle (Transdutores de pressão e piezômetros) | 0,02165 | 175 pontos de medição | X | | X | |
| | 0,02916 | | | | | |
| Informações obtidas com os resultados dos ensaios | - Cd, Cf, Q*; - mapas de níveis d'água; - mapas de pressão no fundo do canal; - mapas de velocidades médias; - mapas de intensidades da turbulência | | - Cd; - mapas de velocidades médias; - mapas de intensidades da turbulência | | - Cd; - mapas de velocidades médias; - mapas de intensidades da turbulência | |

No modelo da escada para peixes por bacias sucessivas com descarregadores de superfície foi possível a obtenção do escoamento “uniforme”, mesmo com a limitação do comprimento do canal. Devido ao represamento causado pelos defletores com a passagem da água somente pelo descarregador cuja soleira situa-se a 0,80 m do fundo, observou-se apenas no último tanque a montante diferenças de profundidades e perdas de carga em relação aos demais tanques.

Nos ensaios no modelo de escada para peixes por bacias sucessivas com orifício de fundo, também se observou dificuldade na obtenção do escoamento “uniforme”. De forma semelhante ao observado no modelo de ranhura vertical, constata-se que seria necessário um canal mais longo para se obter o escoamento “uniforme”. Para cada vazão ensaiada, procurou-se realizar ajustes no reservatório de jusante, com o intuito de obter diferenças aceitáveis de profundidades médias e perdas de carga entre tanques ao longo do canal da escada. Os ensaios foram realizados nessas condições, controlando o comportamento da linha d’água em todo o canal, e não somente no tanque de medições.

4.2 Estrutura A – MTP de Ranhura Vertical

4.2.1 Parâmetros Hidráulicos

Para a avaliação dos parâmetros hidráulicos foram realizadas medições da profundidade média do escoamento no tanque de controle, na região da ranhura de montante e na zona próxima à ranhura de jusante. A seguir são apresentados esses resultados em comparação com os dados de outros pesquisadores, obtidos em modelos de escadas para peixes de ranhura vertical semelhantes à avaliada neste estudo. Os parâmetros hidráulicos foram avaliados com o objetivo de caracterizar o escoamento e verificar se estão de acordo com as respostas obtidas em estruturas com características semelhantes.

4.2.1.1 Coeficiente de descarga

Conforme apresentado anteriormente, o coeficiente de descarga (C_d) pode ser obtido pela Eq. (2.19):

$$C_d = \frac{Q}{b_0 \bar{y} \sqrt{2g\Delta h}} \quad (2.19)$$

sendo: Q a vazão; b_0 a largura da abertura entre os septos; \bar{y} a profundidade do escoamento na parte de montante da ranhura; g a aceleração da gravidade e Δh a perda de energia entre dois tanques consecutivos, podendo ser dada pela diferença entre os níveis a montante e a jusante da ranhura, conforme Figura 2.14.

A Figura 4.1 apresenta alguns dos resultados obtidos, comparando-os com o valor medido no protótipo por Viana (2005) e os dados em modelos de Rajaratnam *et al.* (1986) e (1992) e Coletti (2005). Dos dados de Rajaratnam *et al.* (1986) e (1992), escolheram-se para comparação os resultados referentes às geometrias 1, 16 e 18 (Figura 2.34), que apresentam as

configurações mais próximas da avaliada neste trabalho. Os dados obtidos por Coletti (2005), no protótipo e neste estudo correspondem a ensaios realizados em diferentes escalas de uma mesma estrutura (o modelo utilizado neste estudo é quatro vezes maior que o utilizado por Coletti e cinco vezes menor que o protótipo). Os pontos correspondentes aos ensaios do presente trabalho encontram-se com a mesma tendência e dispersão dos demais autores, sendo que os valores medidos no modelo e no protótipo, para a mesma relação h_m/b_0 , indicam o mesmo comportamento em ambas as estruturas.

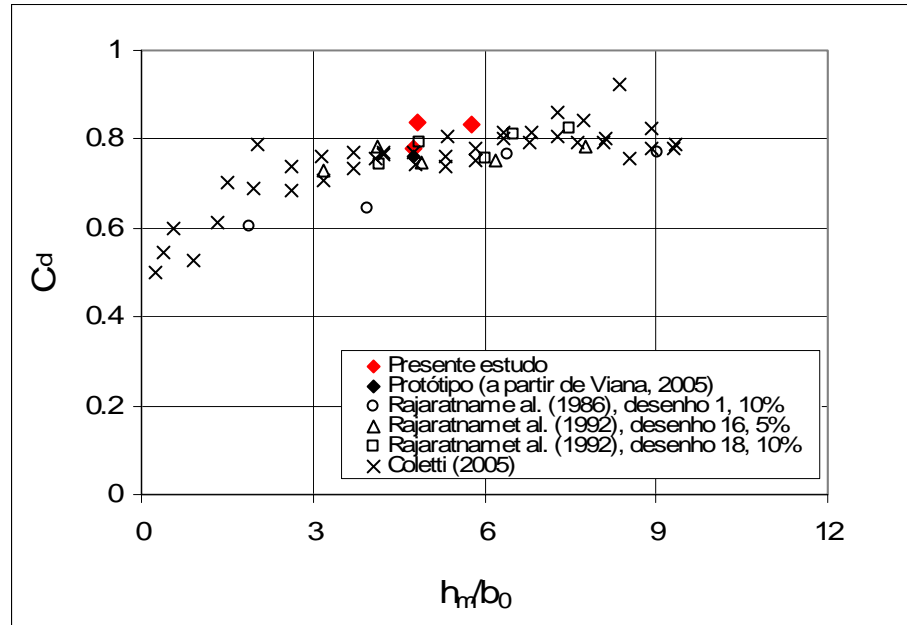


Figura 4.1 – Coeficientes de descarga obtidos neste estudo comparados com o valor medido em protótipo (Viana, 2005) e os dados de Rajaratnam *et al.* (1986) e Coletti (2005), onde h_m é a profundidade média no tanque (na legenda desenhos da Figura 2.34 e declividade das estruturas em percentual).

O valor médio do coeficiente de descarga na avaliação realizada no modelo na escala 1:5 ficou em torno de 0,82, que é inferior ao valor teórico utilizado no projeto da escada para peixes do AHE de Igarapava, de 0,93, no entanto a medição em protótipo, por Viana (2005), também aponta valores do coeficiente de descarga inferiores aos considerados no projeto.

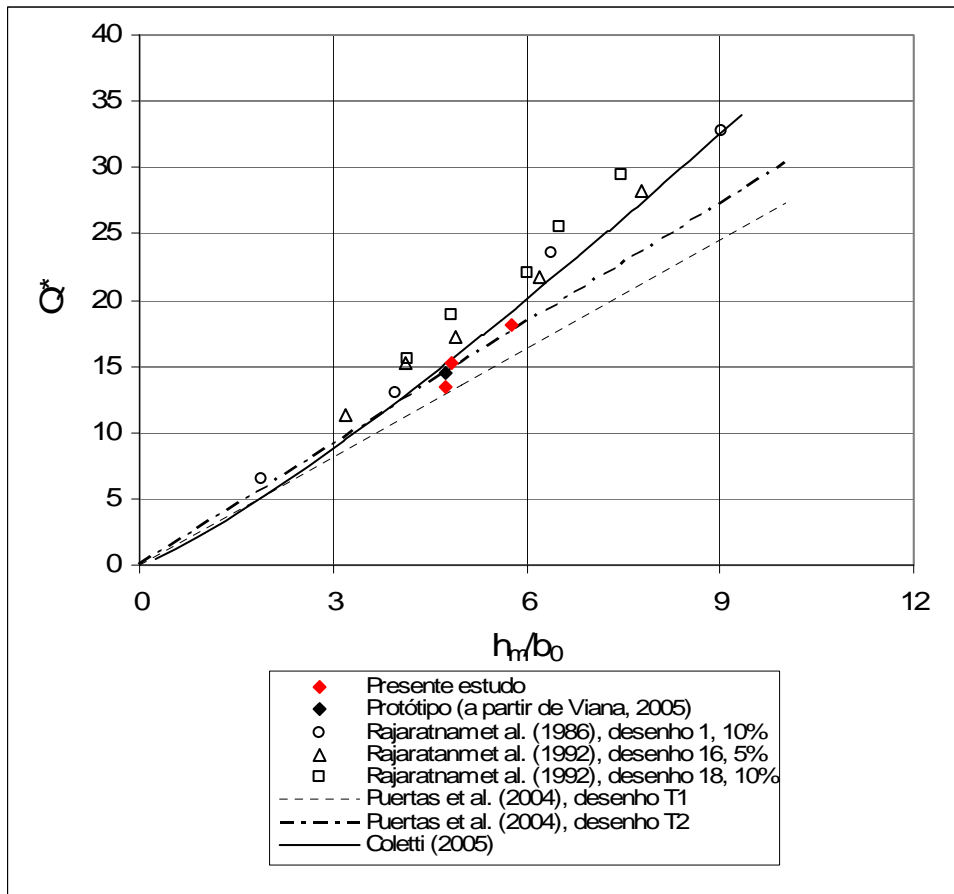
4.2.1.2 Vazão adimensional

A vazão adimensional (Q^*) pode ser obtida através da Eq. (2.15):

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gS_0 b_0^5}} = \frac{h_m}{b_0} \sqrt{\frac{2}{mC_f}} \quad (2.15)$$

sendo: h_m a profundidade média no escoamento uniforme; S_0 a declividade do canal; C_f o coeficiente de cisalhamento; m um coeficiente que depende da geometria da ranhura (neste caso $m = 2$, porque há fluido contornando o jato principal dos dois lados).

Os resultados desse parâmetro são apresentados na Figura 4.2 em comparação com dados de outros pesquisadores. Além da comparação com o valor medido em protótipo (Viana, 2005), e com os resultados em modelo dos autores Rajaratnam *et al.* (1986) e (1992) e Coletti (2005), os dados deste estudo foram confrontados com as proposições de Puertas *et al.* (2004). Puertas *et al.* (2004) avaliaram duas geometrias (Figura 2.36) de escadas para peixes com ranhura vertical, semelhantes aos desenhos 6 e 16 de Rajaratnam. Os valores encontrados neste trabalho estão entre os diferentes dados/proposições, sendo levemente inferiores ao resultado previsto pela equação de Coletti (2005) e aos dados de Rajaratnam *et al.* (1986), com boa concordância com o ponto medido no protótipo e um pouco superiores à curva proposta por Puertas *et al.* (2004), sendo que a situação denominada T1 é a que mais se aproxima do caso aqui estudado.



Observação: Desenhos 1, 16 e 18 na Figura 2.34 (declividade da estrutura em percentual) e desenhos T1 e T2 na Figura 2.36.

Figura 4.2 – Vazão adimensional comparada com resultados da literatura.

4.2.1.3 Coeficiente de cisalhamento

O coeficiente de cisalhamento (C_f) pode ser calculado a partir da Eq. (2.15). Os valores de C_f apresentam-se na Figura 4.3. Esses valores são levemente superiores aos dados apresentados pelos demais pesquisadores, apresentando uma boa concordância com a medição em protótipo..

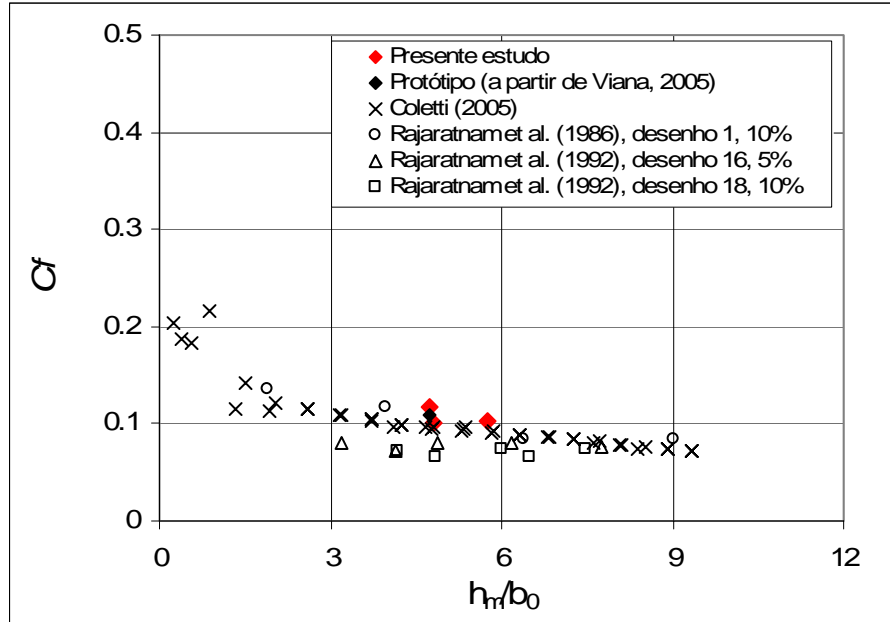


Figura 4.3 – Coeficiente de cisalhamento comparado com dados de outros pesquisadores.

Esta análise dos parâmetros hidráulicos: C_d , Q^* e C_f , para as vazões avaliadas neste estudo, demonstra uma boa concordância com os dados e proposições da literatura. O valor obtido no protótipo, comparado aos parâmetros medidos no modelo, para a mesma relação h_m/b_0 , confirma o comportamento semelhante nas duas estruturas. Esse fato proporciona uma maior segurança na realização dos ensaios, que mesmo observando-se o não atendimento do escoamento definido como “uniforme”, tem-se um tanque de controle (tanque central) onde são realizados os ensaios, cujas características hidráulicas podem ser consideradas representativas do comportamento típico nesse tipo de estrutura.

4.2.2 Profundidade do Escoamento

Conforme comentado no item 3.2.2.1, procurou-se realizar medições da profundidade do escoamento no tanque de controle de forma detalhada, com o objetivo de definir as linhas de nível da superfície livre do escoamento.

A Figura 4.4 apresenta as isolinhas da superfície livre do escoamento. As medições detalhadas da profundidade do escoamento no tanque de controle foram realizadas em pontos

distribuídos conforme a Figura 3.8, com exceção dos pontos próximos às paredes, onde o instrumento de medição não poderia ser posicionado adequadamente. Esses dois mapas do comportamento da superfície livre foram elaborados com escalas de cores diferentes, com o objetivo de demonstrar que, mesmo com profundidades diferentes, tem-se o mesmo tipo de comportamento para diferentes vazões. A profundidade do escoamento é mais significativa na parte de montante do septo maior e a montante da ranhura, na região de aproximação. Ao passar pela ranhura, observa-se o rebaixamento da superfície d'água de forma acentuada. Avaliando as seções transversais ao tanque, tem-se que na região do jato principal as profundidades são menores em relação às regiões de recirculação, conforme o padrão geral do escoamento que está mais bem detalhado no item 4.2.4.2. Observando-se o comportamento da superfície livre obtido por Pena (2004), para declividades do canal de 5,7% e 10,054%, verifica-se que, mesmo com geometrias diferentes, as características gerais são semelhantes às desta estrutura.

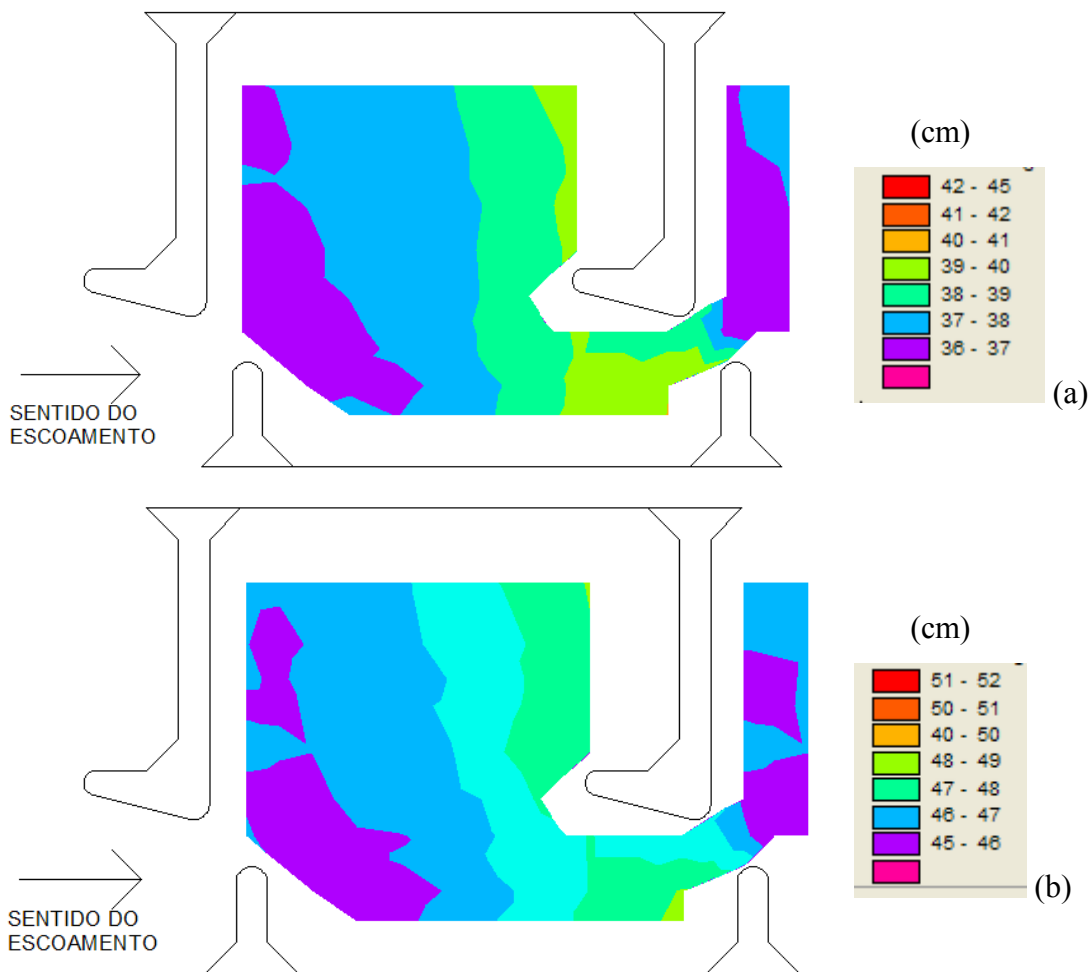


Figura 4.4 – Linhas de nível da superfície livre do escoamento no tanque de controle para:

(a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$ e (b) $Q= 0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, do presente estudo.

4.2.3 Pressões no Fundo do Canal

Foram realizadas medições da pressão no fundo do tanque para duas vazões diferentes. A seguir apresentam-se os resultados obtidos para a vazão correspondente à estudada por Coletti (2005) em um modelo na escala 1:20, quatro vezes menor que o aqui avaliado (escala 1:5).

A Figura 4.5 apresenta o campo de pressões médias, comparando os dados obtidos com os transdutores e com os piezômetros. Os dois mapas são apresentados com o objetivo de demonstrar que os resultados obtidos pelos dois métodos são muito semelhantes, sendo que a vantagem da utilização dos transdutores está na possibilidade do registro de séries temporais de valores com curtos intervalos de tempo (50 dados por segundo). A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos por Coletti (2005) em um modelo na escala 1:20. Transpondo esses resultados para a situação de um modelo na escala 1:5, pode-se observar que os valores de pressão do presente estudo apresentam uma amplitude de valores inferior à obtida por Coletti (2005). Coletti (2005) verificou no campo de pressões médias a formação, na região da recirculação maior, de duas zonas diferentes: uma com valores de pressão maiores que a média e outra com valores inferiores, o que não foi encontrado neste trabalho. A região a montante da ranhura apresenta valores de pressão maiores, que diminuem bruscamente com a passagem pela abertura, observado neste trabalho e por Coletti (2005), seguindo o comportamento das variações da profundidade do escoamento.

Comparando-se os resultados de pressão média com o comportamento da superfície livre do escoamento verifica-se, como esperado, comportamentos gerais semelhantes.

A Figura 4.7 apresenta a variação, no interior do tanque, de alguns momentos estatísticos dos valores de pressão: desvio padrão e coeficientes de assimetria e curtose.

Observa-se, como encontrado por Coletti (2005), que a região do jato apresenta valores de desvio padrão maiores que os presentes nas regiões de recirculação. Analisando os campos dos coeficientes de assimetria e curtose, observa-se que é na região do jato que os valores se afastam mais do comportamento característico de uma distribuição normal.

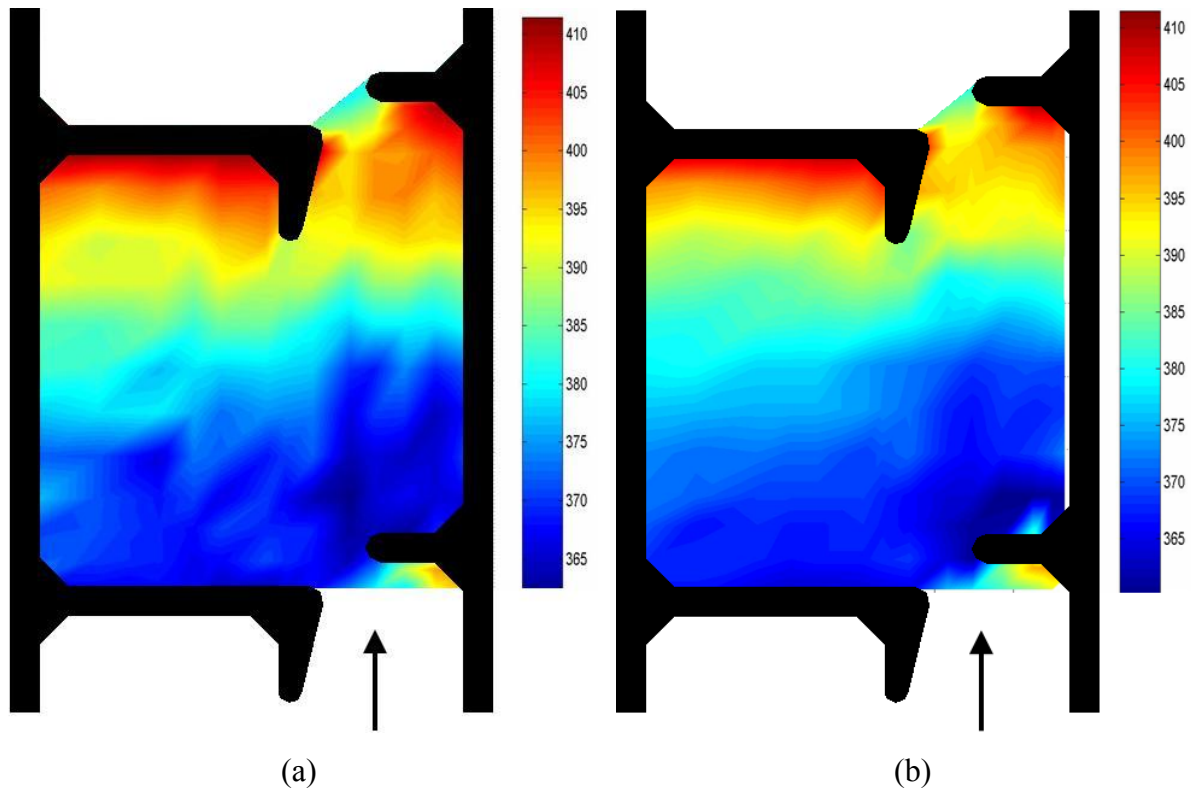


Figura 4.5 – Campo de pressões médias obtido com: (a) transdutores; (b) piezômetros, em mm.c.a, para a vazão de $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$ em modelo 1:5 (presente estudo).

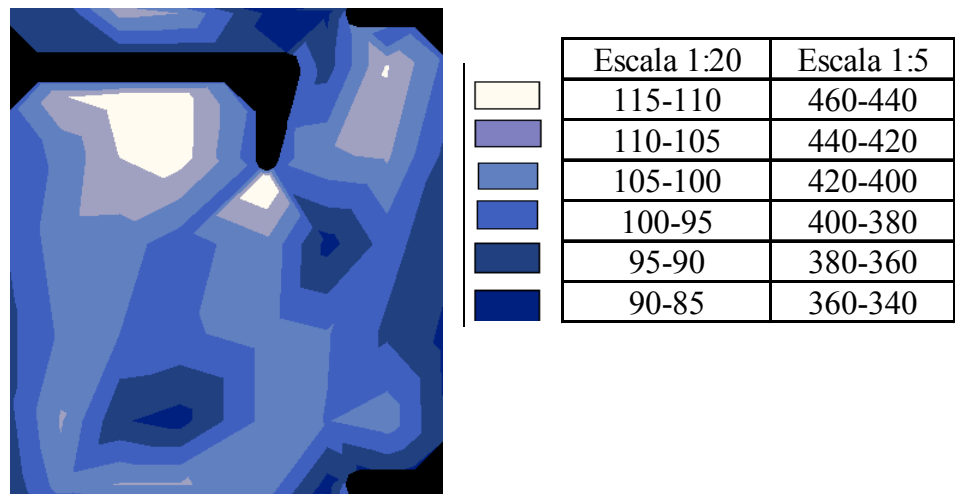


Figura 4.6 – Campo de pressões médias obtido por Coletti (2005) para a vazão correspondente a $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo 1:5.

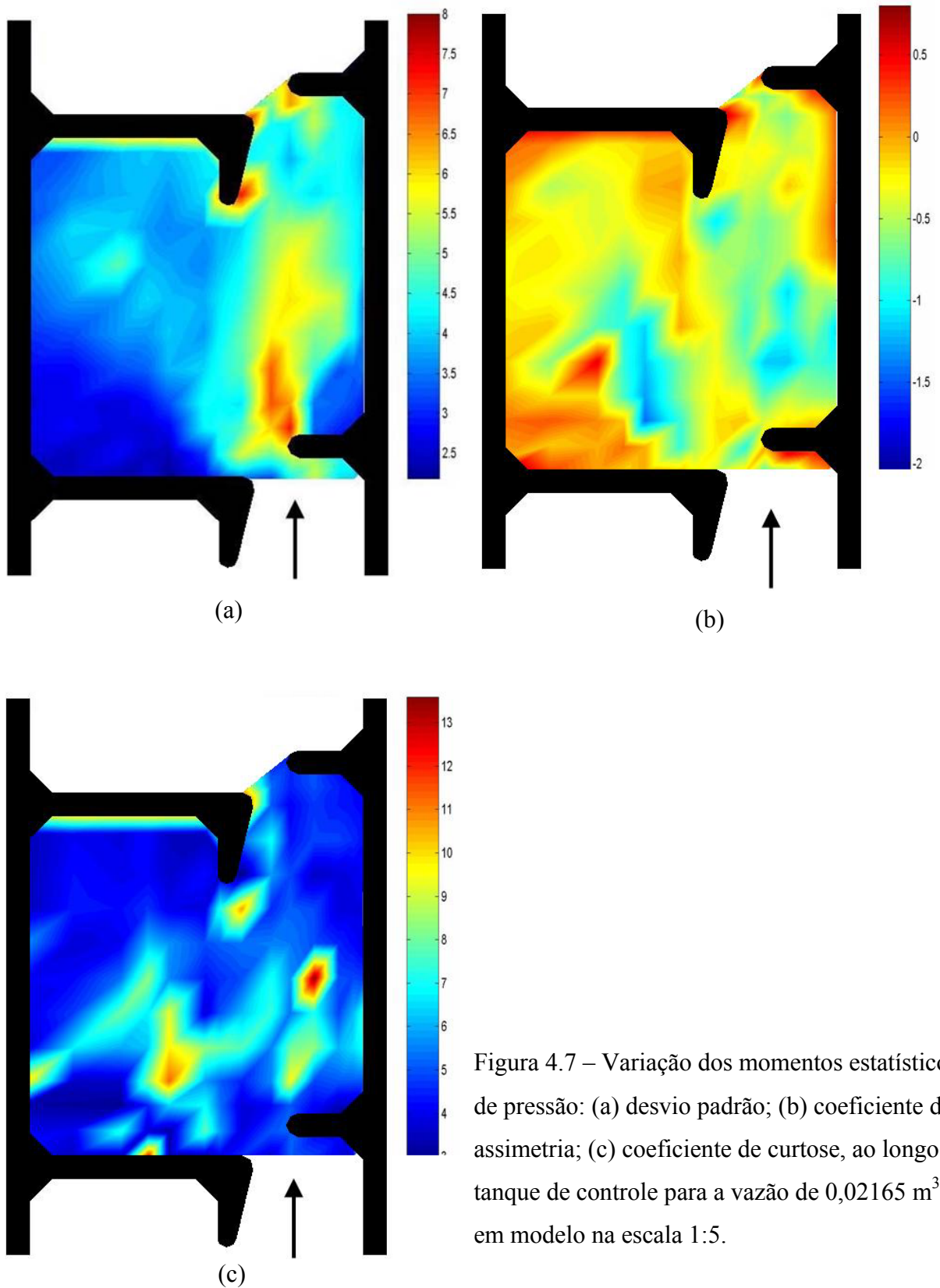


Figura 4.7 – Variação dos momentos estatísticos de pressão: (a) desvio padrão; (b) coeficiente de assimetria; (c) coeficiente de curtose, ao longo do tanque de controle para a vazão de $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$ em modelo na escala 1:5.

4.2.4 Velocidades e Turbulência

Neste item apresentam-se os resultados obtidos através das medições de velocidades com o ADV em um dos tanques e na região da ranhura (conforme exposto no Capítulo 3) do modelo da escada para peixes de ranhura vertical. Os resultados correspondem a valores de modelo (escala 1:5).

O ADV mede velocidades na água em 3 direções (sistema cartesiano x, y, z) com frequências de aquisição de até 25 ou 50 Hz (dependendo do equipamento), o que possibilita a avaliação de características turbulentas do escoamento. Alguns pesquisadores, entre eles, Voulgaris & Trowbridge, 1998; Nikora & Goring, 1998; Song & Chiew, 2001; Goring & Nikora, 2002; Smith *et al.*, 2002; Martin *et al.* 2002; Wahl, 2003; García *et al.*, 2005, e outros, realizaram trabalhos com o intuito de verificar o desempenho desse instrumento para avaliar parâmetros turbulentos e testam processos, geralmente filtros digitais, que retiram o ruído branco inerente à medição pelo efeito Doppler. No Anexo 2 relatam-se os testes que foram realizados neste trabalho durante a seleção do melhor procedimento a adotar no pré-processamento dos dados.

A partir da análise apresentada no Anexo 2, optou-se pela utilização de um filtro, conforme proposto por Goring & Nikora (2002) e Wahl (2003), cuja rotina está inserida no programa WinADV, fornecido pelo fabricante do ADV (Sontek).

A magnitude do vetor velocidade (instantânea ou média) em cada ponto pode ser calculada por:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (4.1)$$

onde V_x , V_y e V_z são as componentes cartesianas da velocidade (x, y, z, respectivamente).

As velocidades instantâneas podem ser utilizadas para estimar parâmetros da turbulência. A série de velocidades temporal ($V_i(t)$) pode ser dividida em uma média temporal ($\bar{V}_x, \bar{V}_y, \bar{V}_z$) e uma componente turbulenta ($v_x'_{inst}, v_y'_{inst}, v_z'_{inst}$) que é igual à diferença entre o valor instantâneo e a média. A série de velocidades temporal pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} V_x(t) &= \bar{V}_x + v_x'_{inst} \\ V_y(t) &= \bar{V}_y + v_y'_{inst} \\ V_z(t) &= \bar{V}_z + v_z'_{inst} \end{aligned} \quad (4.2)$$

A energia cinética média (K) é definida por:

$$K = \frac{1}{2} (\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2 + \bar{V}_z^2) \quad (4.3)$$

A energia cinética da turbulência (k) é dada pela equação (2.41):

$$k = \frac{1}{2} \left(v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2 \right) \quad (2.41)$$

Onde v_x' , v_y' , v_z' representam a raiz da média das flutuações quadráticas de velocidade (desvio padrão da série temporal), para as componentes da velocidade longitudinal (x), transversal (y) e vertical (z), respectivamente

A intensidade da turbulência (IT) é definida pela razão entre a raiz da média das flutuações quadráticas de velocidade (desvio padrão) pela velocidade média, conforme a equação a seguir:

$$IT = \frac{v_i'}{V_i} \quad (4.4)$$

A intensidade cinética da turbulência é dada por:

$$ICT = \frac{k}{V^2} \quad (4.5)$$

De acordo com Odeh *et al.* (2002), um bom indicativo da severidade da turbulência sobre o peixe são as tensões de Reynolds, que podem ser calculadas para os três planos (paralelo ao fundo, longitudinal e transversal).

$$\begin{aligned} & -\rho \cdot v_x'_{inst} \cdot v_y'_{inst} \\ & -\rho \cdot v_x'_{inst} \cdot v_z'_{inst} \\ & -\rho \cdot v_y'_{inst} \cdot v_z'_{inst} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Sendo ρ a massa específica da água e $v_x'_{inst}$, $v_y'_{inst}$, $v_z'_{inst}$ as flutuações instantâneas das componentes de velocidade em relação a média temporal em cada uma das direções x, y, z, respectivamente. A tensão de Reynolds em um ponto é dada pela média das tensões de Reynolds calculadas em cada instante da amostra de velocidades.

Nos itens seguintes apresentam-se os resultados de velocidades médias e parâmetros da turbulência na forma de mapas, que foram obtidos a partir de interpolações lineares das medições pontuais, nos diferentes planos.

4.2.4.1 Campos de velocidades médias

A avaliação dos campos de velocidades médias é fundamental para a definição das características principais do escoamento. A visualização do campo de velocidades médias auxilia na definição do padrão do escoamento dentro do tanque e na caracterização das magnitudes e distribuição dos vetores velocidade. Nessa fase podem ser identificados determinados comportamentos do fluxo, como regiões de recirculação, zonas com

velocidades elevadas, entre outros, que dificultam ou impossibilitam a utilização da escada para peixes por certos indivíduos.

A Figura 4.8, a Figura 4.9 e a Figura 4.10 apresentam os campos de velocidades em planos paralelos ao fundo do canal. Os vetores indicam as componentes nos respectivos planos, e em escalas de cores são representadas as componentes verticais de velocidade. Nas três vazões ensaiadas para as diferentes profundidades do escoamento observa-se a formação de um jato principal, caracterizado pelo fluxo entre ranhuras consecutivas, onde as velocidades são maiores, conforme já observado em estudos anteriores em MTP do tipo ranhura vertical (Rajaratnam *et al.*, (1986) e (1992), Wu *et al.* (1999), Pena (2004), Liu *et al.* (2006), Liu (2004), Viana (2005), entre outros). Nas regiões adjacentes ao jato principal formam-se zonas de recirculação: uma maior, confinada pelos defletores maiores, pela parede lateral e pelo jato principal, e outra recirculação menor formada do outro lado, entre os defletores menores, o jato principal e a parede lateral oposta.

Uma análise preliminar a partir dos campos de velocidades nos planos paralelos a soleira indica não existirem variações significativas do comportamento do escoamento ao longo da profundidade. Para verificar a variação dos campos de velocidade em diferentes planos paralelos ao fundo, avaliou-se o comportamento dos vetores de velocidade, para as diferentes profundidades, no caminho do jato principal, conforme pode ser observado na Figura 4.11. Nessa figura tem-se que as componentes de velocidade nos planos paralelos à soleira apresentam, nas três vazões ensaiadas, comportamento praticamente independente da profundidade do escoamento no caminho do jato principal. Observa-se que ao serem comparadas as magnitudes dos vetores de velocidade das três vazões, na Figura 4.11(a), (b) e (c), têm-se valores independentes da descarga.

Nesta análise inicial, onde são negligenciadas as componentes verticais de velocidade, verificam-se indícios do valor da velocidade em determinado ponto do tanque ser independente da profundidade e da vazão, conforme já foi relatado em estudos anteriores (Pena, 2004) com escadas do tipo ranhura vertical com geometrias diferentes da que está sendo aqui avaliada.

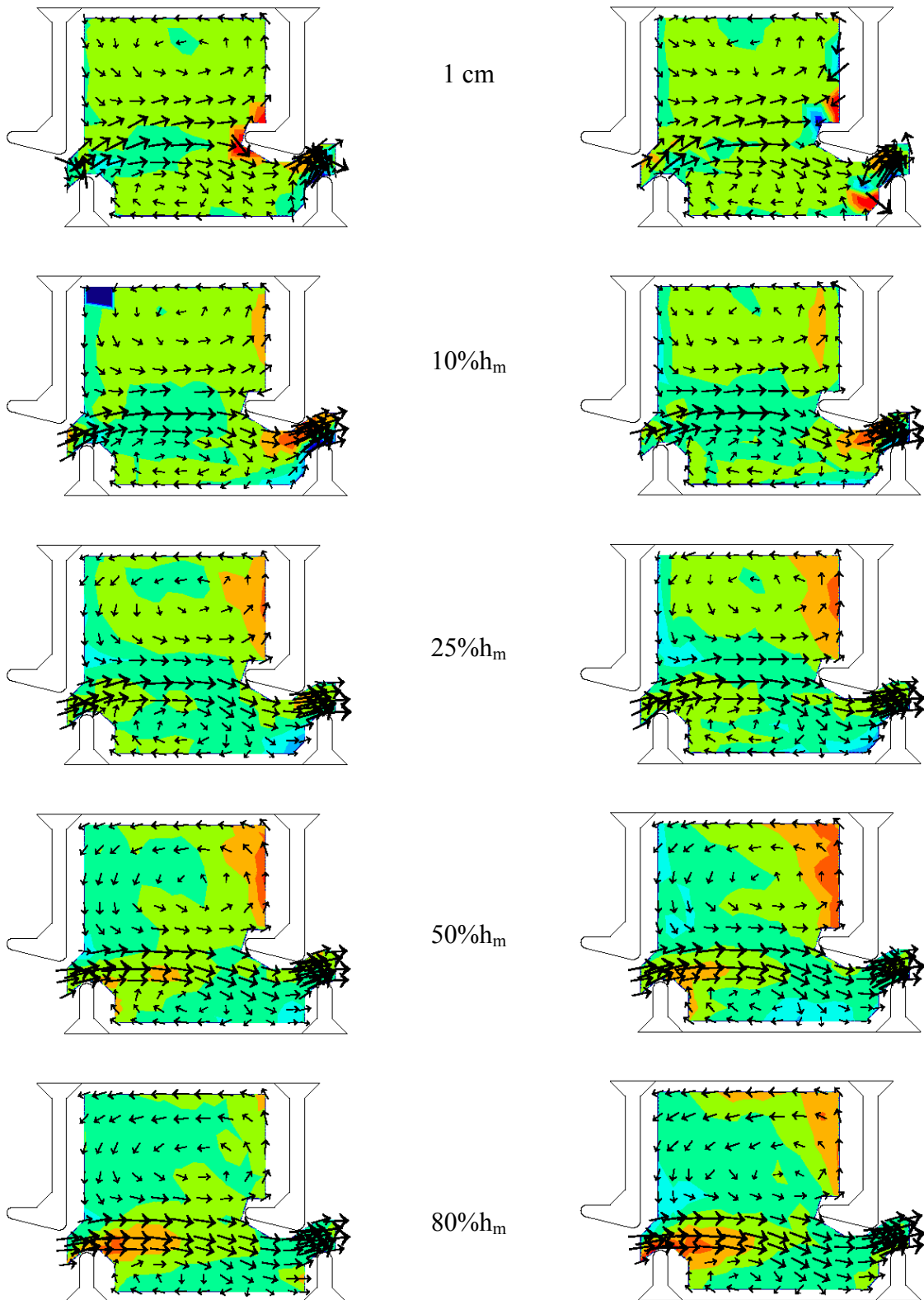


Figura 4.8 – Campo de velocidades médias para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.9 – Campo de velocidades médias para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

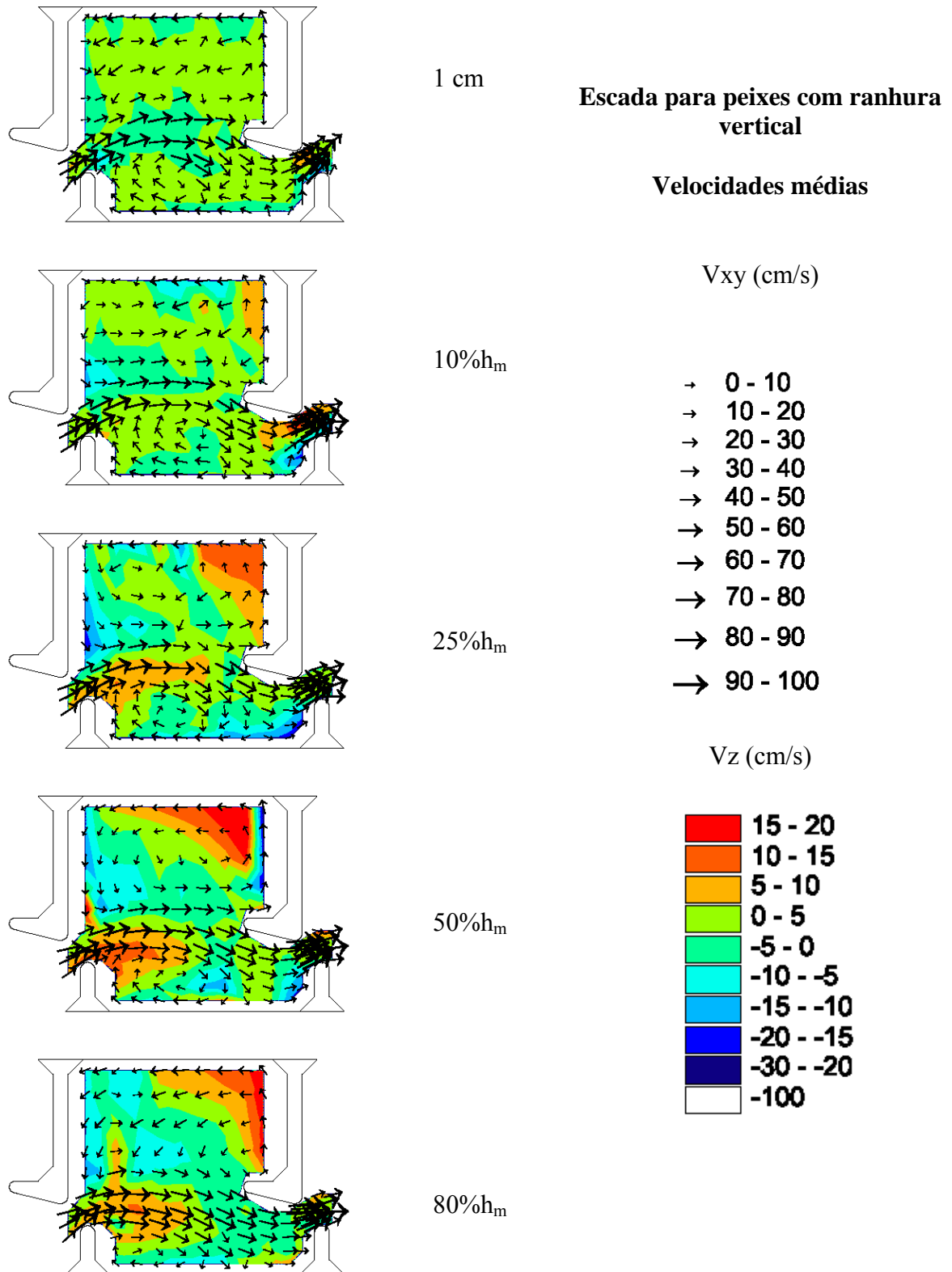
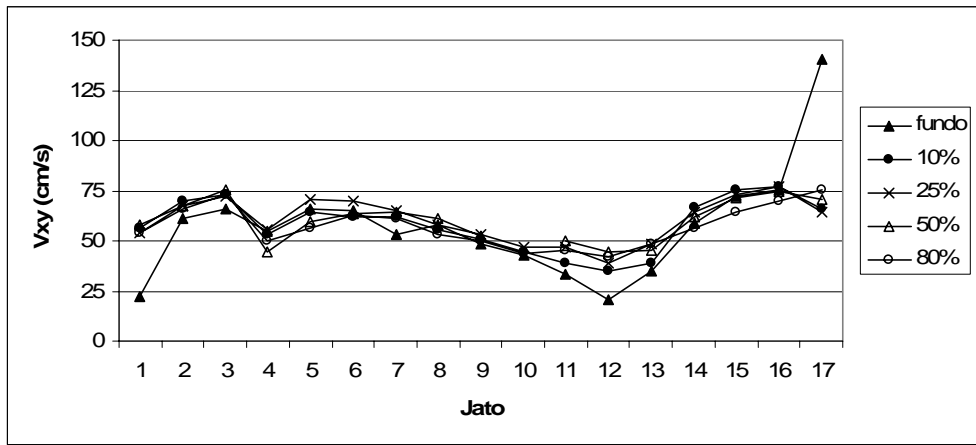
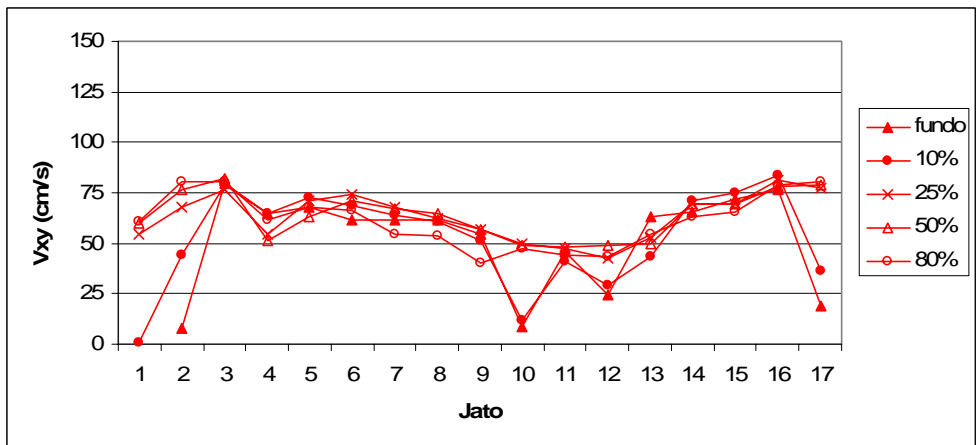


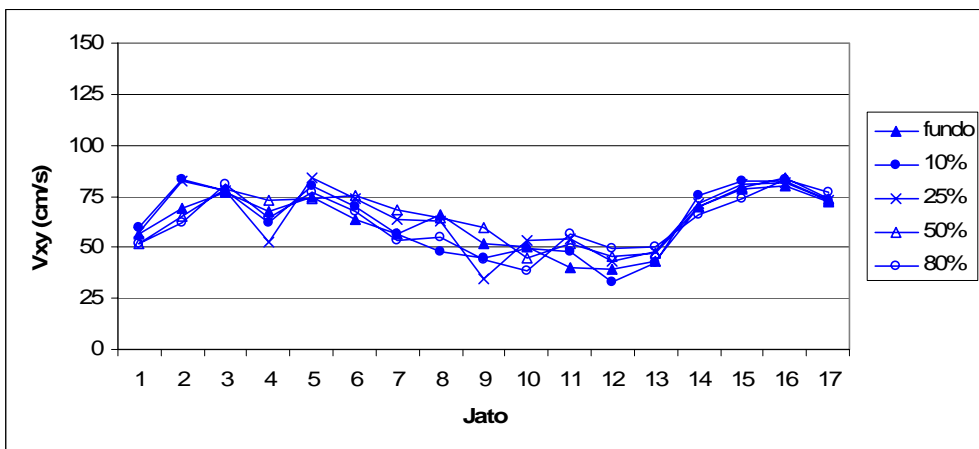
Figura 4.10 – Campo de velocidades médias para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).



(a)



(b)



(c)

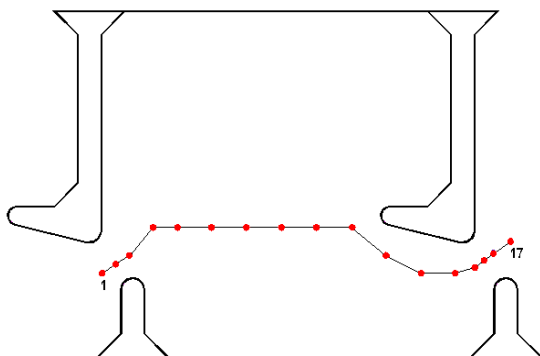


Figura 4.11 – Velocidades no plano paralelo ao fundo, em diferentes profundidades, na linha do jato principal: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os campos de velocidades médias foram adimensionalizados utilizando a velocidade potencial, dada por $\sqrt{2g\Delta h}$. Esse tipo de apresentação dos resultados facilita a avaliação do comportamento do escoamento em estruturas com outras escalas e em comparação com estudos de outros pesquisadores. Os mapas do comportamento de velocidade adimensionalizada apresentam-se no Anexo 4.

Observa-se que a escada para peixes com ranhura vertical apresenta na maior parte do tanque valores de velocidades bastante inferiores à velocidade potencial. Nas regiões de recirculação do escoamento, em todos os planos paralelos ao fundo, a velocidade não ultrapassa 40% da velocidade potencial. Na zona do fluxo principal, observam-se algumas regiões com velocidades entre 80 e 100% da velocidade potencial, mas na maior parte do jato têm-se valores entre 60 e 80%. Esta avaliação mostra aspectos importantes e favoráveis aos peixes, que encontram ao longo do percurso várias regiões com velocidades inferiores à máxima esperada na passagem pela ranhura.

Na Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10, as componentes verticais da velocidade estão representadas através dos mapas de cores. Observa-se que estas são de pequena magnitude em comparação com as componentes horizontais presentes nos planos paralelos ao fundo do canal. Verifica-se que as maiores componentes verticais encontram-se em planos mais superficiais e em duas regiões: logo após a passagem da água pela ranhura e junto ao defletor maior de jusante. Nos dois casos as componentes são positivas, indicando um fluxo ascensional. No primeiro caso, têm-se efeitos devido à passagem de água pela ranhura. No segundo caso, tem-se uma sobrelevação do escoamento devido ao efeito de represamento causado pelo defletor. Observam-se algumas componentes de velocidades verticais negativas em pontos isolados, que, a princípio, não definem um comportamento padrão.

As variações das componentes de velocidade vertical estão entre $-0,30$ m/s e $+0,20$ m/s. Comparando-se esses valores com os valores máximos dos vetores de velocidade média nos planos paralelos ao fundo, que estão na ordem de $1,00$ m/s, considera-se que as componentes verticais são pouco significativas.

No entanto, para um melhor estudo das componentes verticais, da Figura 4.12 até a Figura 4.19 apresentam-se alguns campos de velocidades longitudinais e transversais. Através dessas figuras, observa-se, como já havia sido verificado para a avaliação dos campos horizontais, que o comportamento dos vetores de velocidade é muito semelhante para as três descargas.

No plano vertical longitudinal que passa próximo à parede (Figura 4.12), junto ao defletor menor, observam-se os vetores de velocidade no sentido contrário ao fluxo principal, devido a este plano passar na região da recirculação menor, na parte do contrafluxo. Próximo

à ranhura de jusante têm-se os vetores no sentido do fluxo influenciados pelo jato principal que passa pela ranhura, como pode também ser observado nos planos paralelos ao fundo. Isso mostra a delimitação da região da recirculação menor, sendo que esta é levemente maior nas posições mais próximas ao fundo, confirmando o observado nos planos horizontais, ou seja, que o jato principal apresenta uma zona de influência maior nas regiões mais superficiais. Nesse plano as componentes verticais são pouco pronunciadas.

O plano vertical que passa entre ranhuras consecutivas (Figura 4.13) mostra o comportamento dos vetores de velocidade no caminho do jato principal. Observa-se que na região da ranhura (aproximação e logo ao passar por esta), os vetores de velocidade indicam um fluxo predominantemente bidimensional, com componentes verticais desprezíveis para as três vazões ensaiadas.

O plano apresentado na Figura 4.14 localiza-se longitudinalmente, logo à esquerda do plano que passa pelas ranhuras. Nesse plano verifica-se o comportamento dos vetores de velocidade em uma região que faz parte do jato principal, adjacente à região da recirculação maior. Esses campos de velocidade repetem o comportamento observado no plano ranhura-ranhura (Figura 4.13), com componentes horizontais de velocidade predominantes.

Os vetores de velocidade da Figura 4.15 são relativos a um plano que passa longitudinalmente pelo centro da recirculação maior. Nessa região as componentes são de menor magnitude, como se esperava e observa-se um comportamento rotacional predominante no sentido anti-horário. Isso demonstra que uma análise preliminar dos campos de velocidades horizontais indica correntes principais semelhantes ao longo da profundidade, desprezando-se as componentes verticais, mas nesta análise surgem informações que possibilitam afirmar que existem correntes ascensionais e descensionais, embora com magnitudes inferiores às horizontais.

A Figura 4.16 mostra o comportamento das velocidades em um plano vertical próximo a parede, junto à recirculação maior. Como esse plano passa pela região de retorno da grande recirculação, observam-se os vetores todos no sentido do contrafluxo com um comportamento levemente ascensional ao se afastar do defletor de jusante.

Apresentam-se três planos transversais: um na parte de montante do tanque, na primeira linha onde foram realizadas medições (Figura 4.17), um segundo nas proximidades do centro do tanque (Figura 4.18) e um terceiro próximo ao defletor de jusante (Figura 4.19).

Nos três planos transversais observam-se vetores de velocidade de maior magnitude na região do jato principal. As velocidades no jato principal apresentam componentes verticais praticamente desprezíveis nos planos transversais mais próximos dos defletores e valores mais pronunciados no plano que passa pelo centro do tanque. No plano da Figura 4.17

verificam-se, além dos vetores do jato principal, os vetores de menores magnitudes da região da recirculação, com uma leve característica descensional, mais pronunciada para a maior vazão. Já no plano transversal central (Figura 4.18) não se observa um comportamento característico dos vetores na região da recirculação. No plano transversal da Figura 4.19 têm-se os vetores de velocidade bem definidos segundo o fluxo, mostrando claramente as duas recirculações adjacentes ao jato principal. Nesse plano, em oposição ao observado na Figura 4.17, tem-se um fluxo ascensional na parte da recirculação maior.

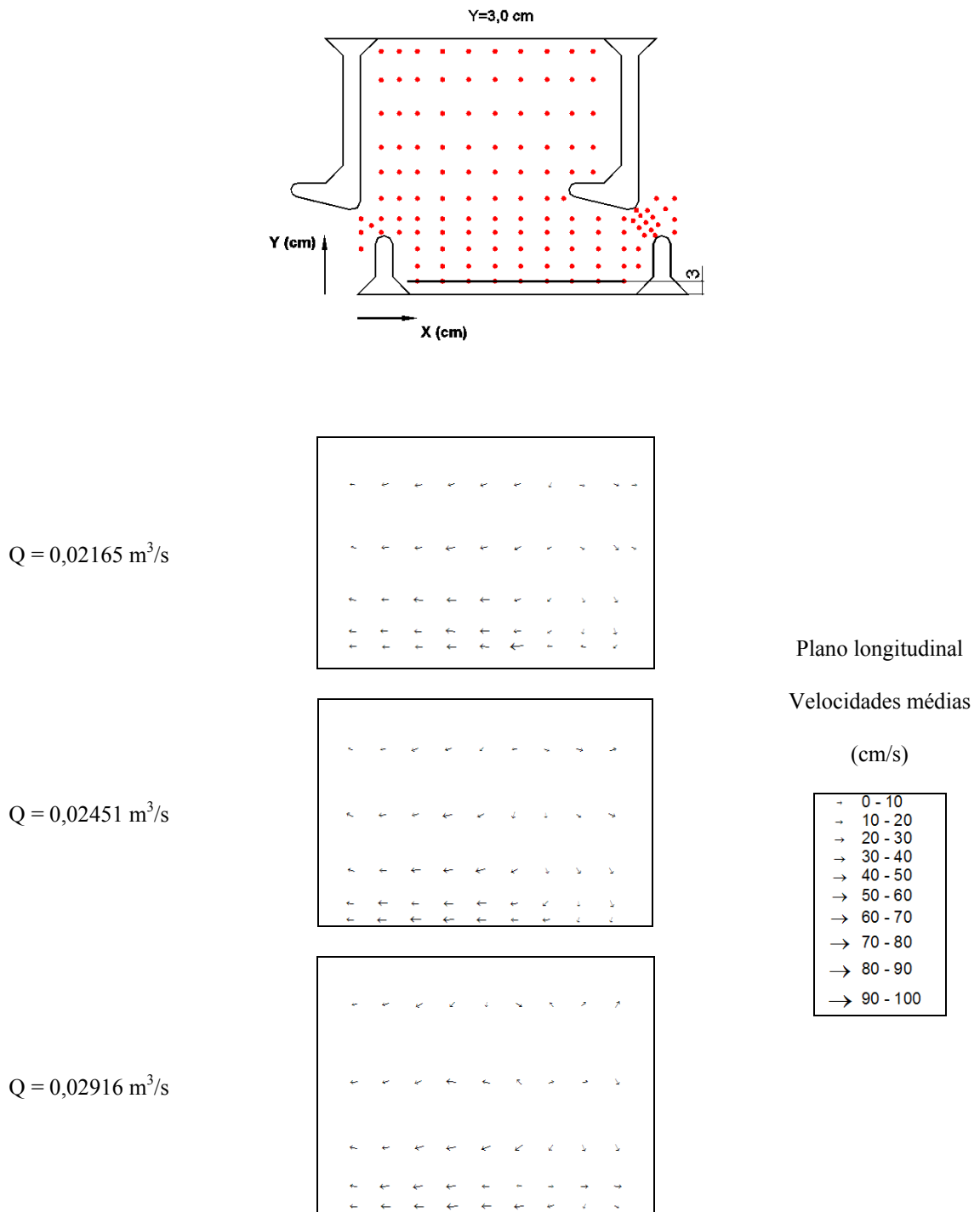


Figura 4.12 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=3 \text{ cm}$).

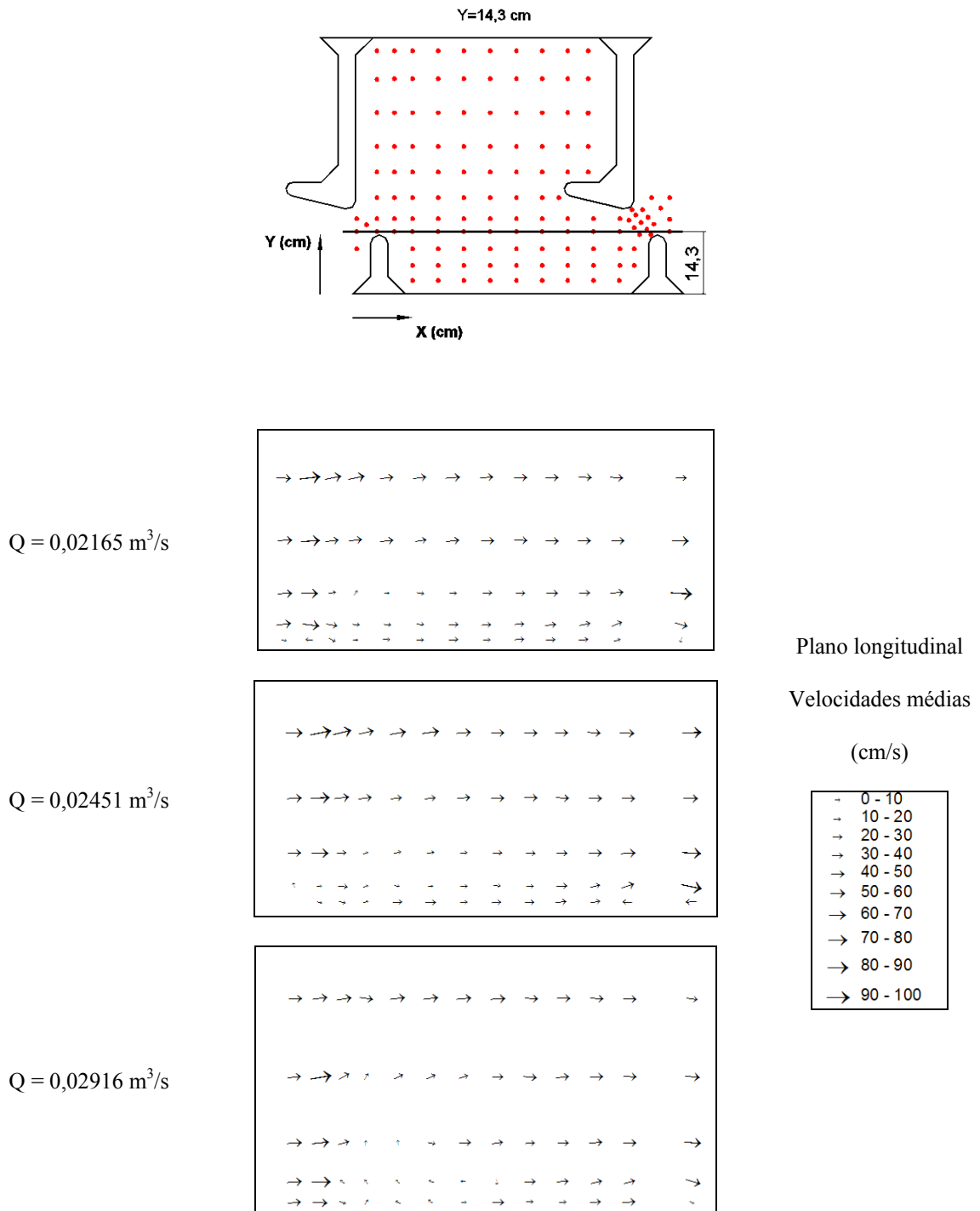


Figura 4.13 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=14,3 \text{ cm}$).

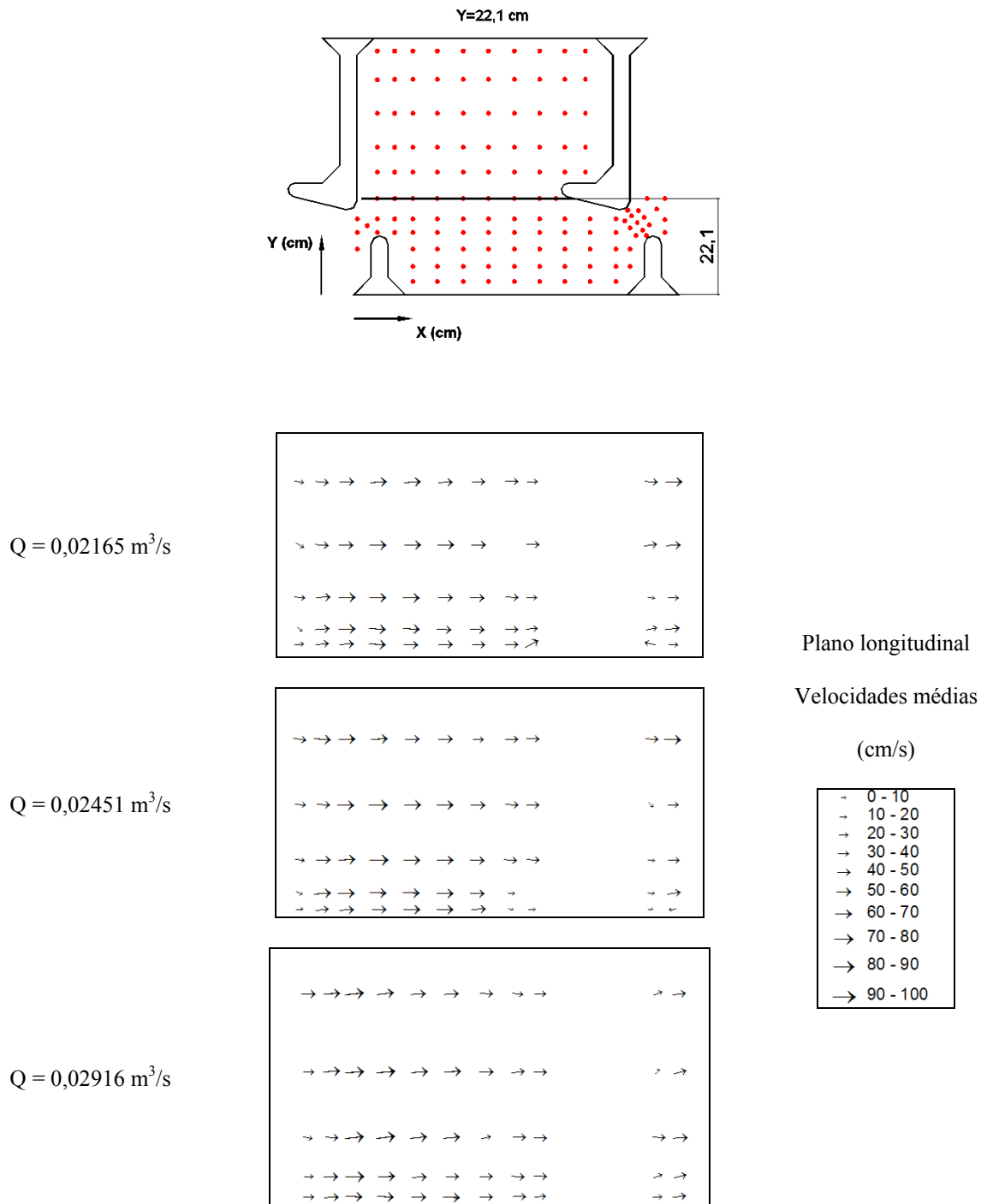


Figura 4.14 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=22,1 \text{ cm}$).

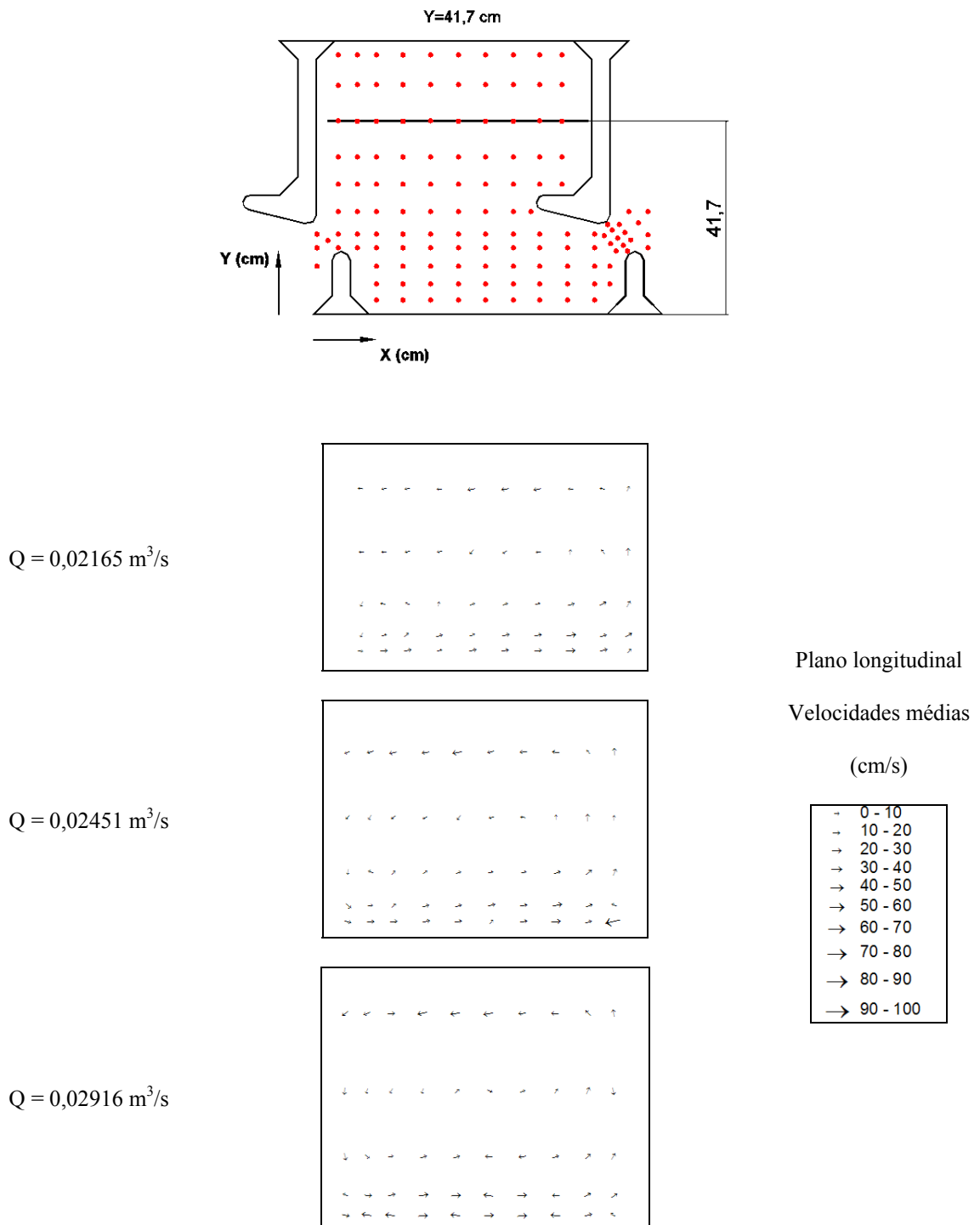


Figura 4.15 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima (Y=41,7 cm).

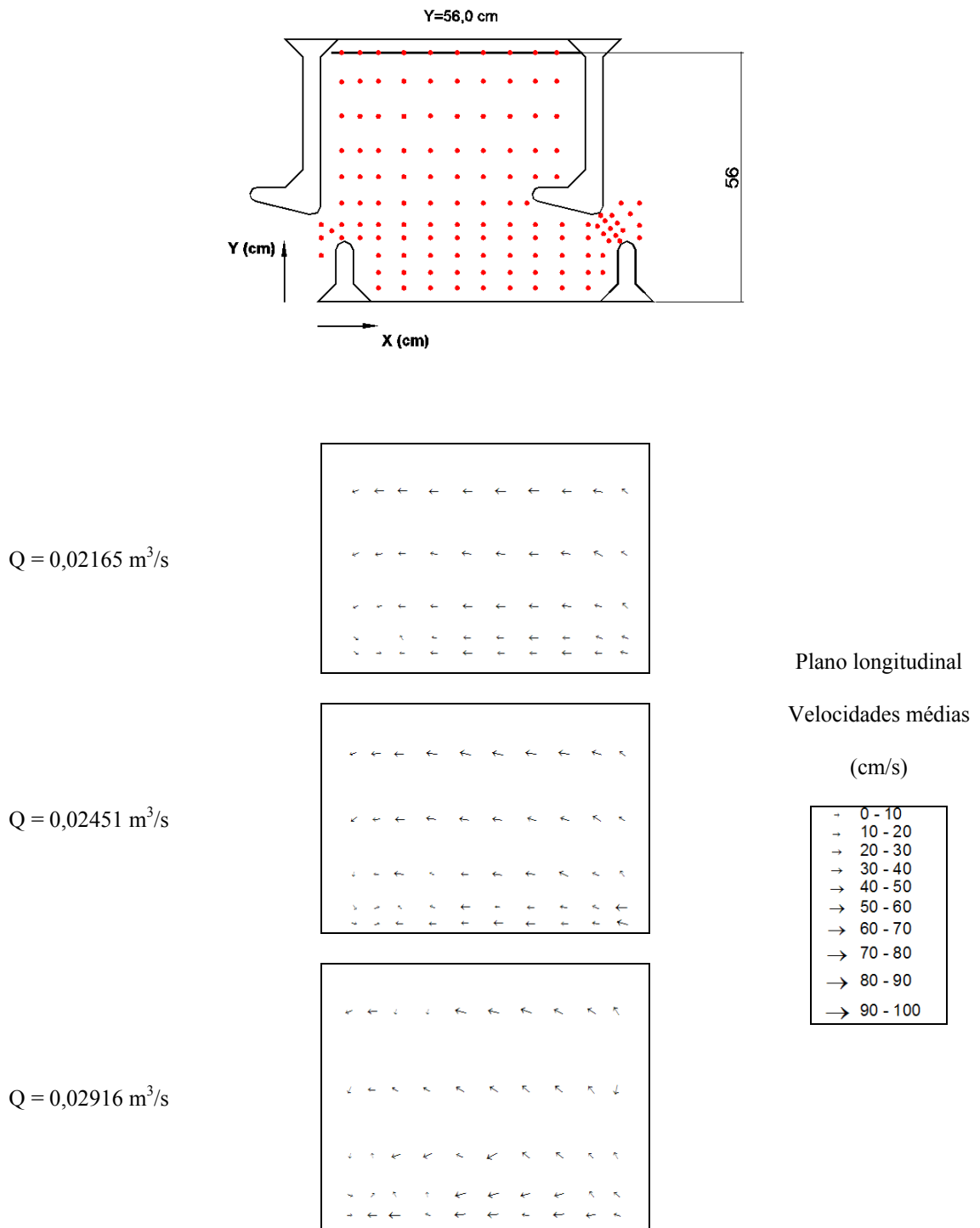


Figura 4.16 – Campo de velocidades em um plano vertical longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=56,0 \text{ cm}$).

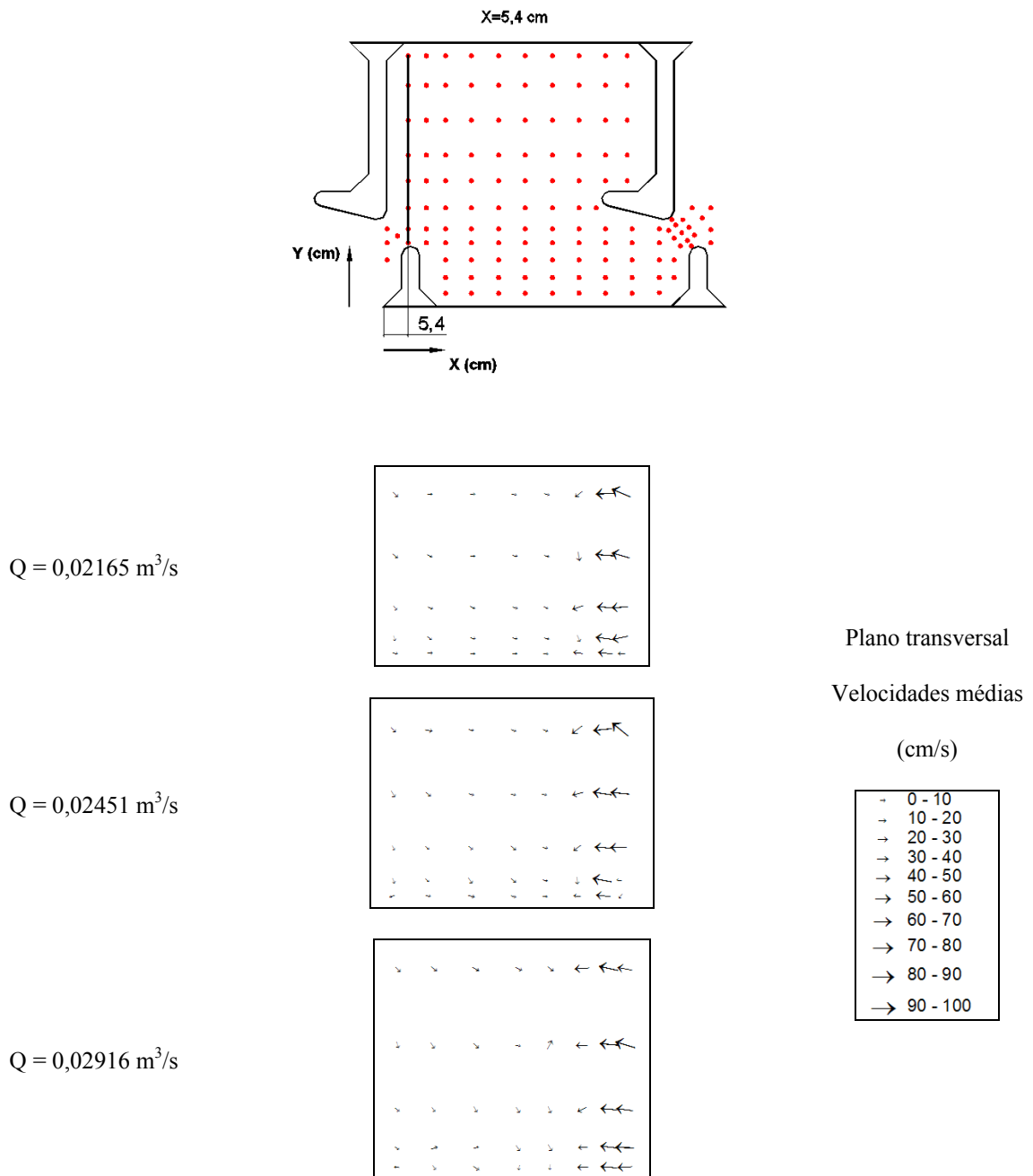


Figura 4.17 – Campo de velocidades em um plano vertical transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=5,4 \text{ cm}$).

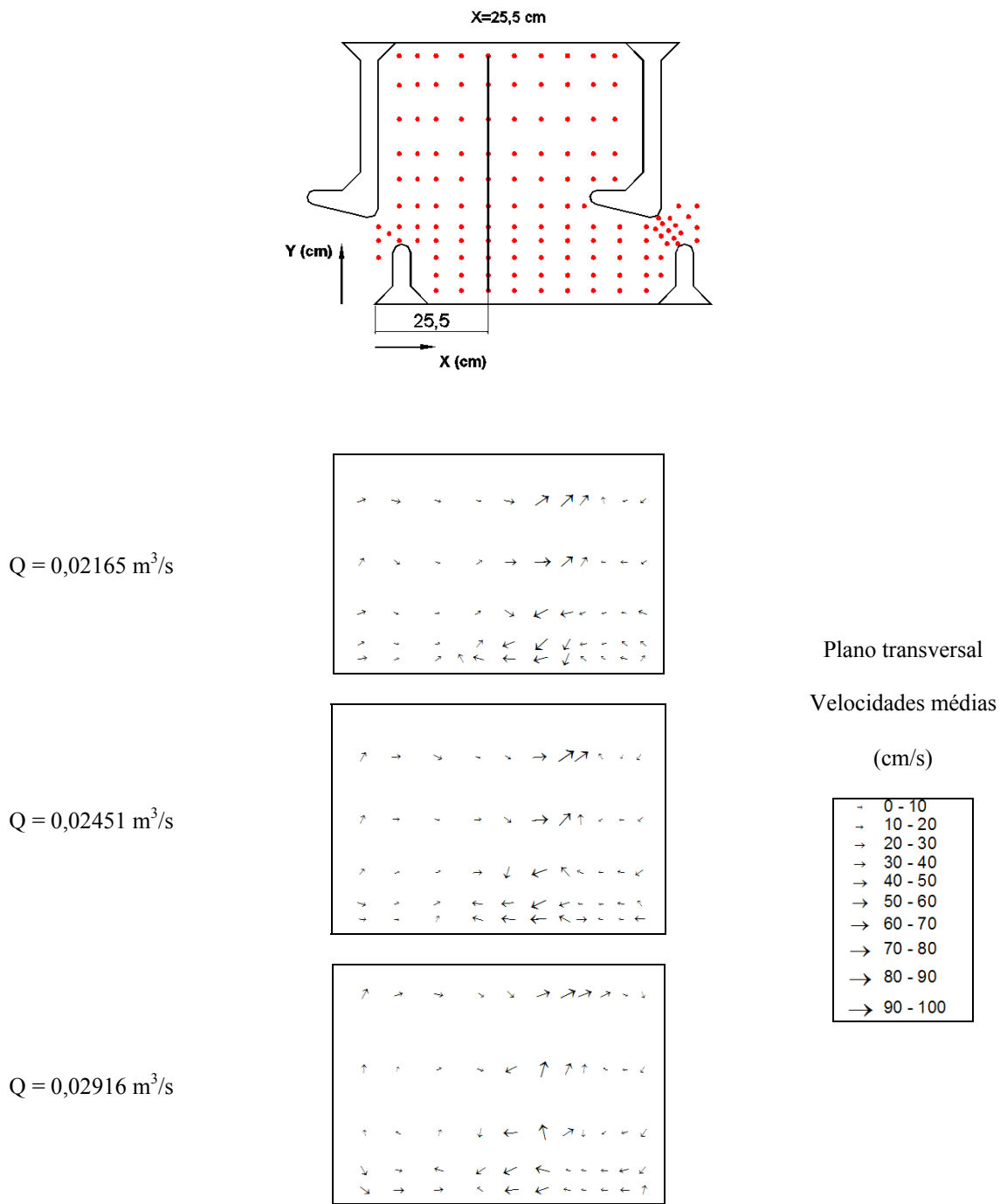


Figura 4.18 – Campo de velocidades em um plano vertical transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=25,5 \text{ cm}$).

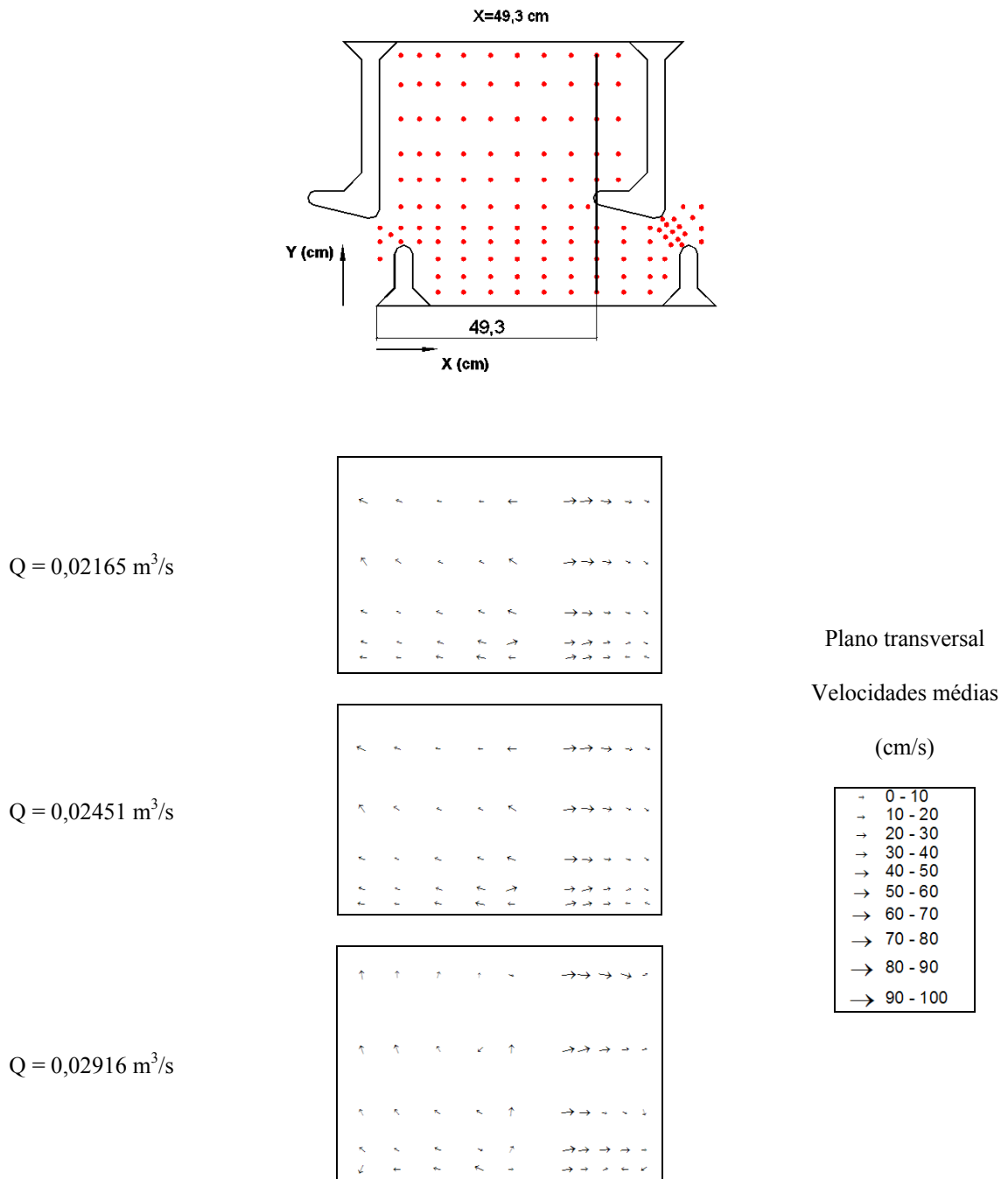


Figura 4.19 – Campo de velocidades em um plano vertical transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=49,3 \text{ cm}$).

4.2.4.2 Características gerais do escoamento

A partir da análise dos campos de velocidades médias no item anterior, pode-se identificar o padrão geral do escoamento nesta estrutura. Como já relatado, por outros autores, entre eles: Rajaratnam *et al.*, (1986) e (1992), Wu *et al.* (1999), Pena (2004), Liu *et al.* (2006) e Viana (2005), em estruturas com diferentes geometrias de escadas para peixes do tipo ranhura vertical, tem-se um jato principal conectando ranhuras consecutivas, onde as velocidades são as mais elevadas dentro dos tanques, com componentes predominantemente horizontais. Adjacente ao jato principal existem duas zonas de recirculação do escoamento, uma de cada lado, onde as velocidades são menores.

Entre o jato principal, a parede lateral e os defletores maiores existe uma grande recirculação de eixo vertical, no sentido anti-horário, com componentes horizontais de grande magnitude em todas as profundidades. A avaliação de planos verticais indica a presença de correntes de recirculação secundárias de eixo horizontal transversal (na parte central da grande recirculação de eixo vertical), com velocidades de menor magnitude, com deslocamento do fluxo no sentido de ascensão junto ao defletor de jusante do tanque de controle, e de descida, junto ao tanque de montante. Esse comportamento só pode ser observado durante a avaliação dos campos verticais de velocidade, já que a avaliação das componentes em planos horizontais não indicam modificações consideráveis para as diferentes profundidades.

A região da recirculação menor de eixo vertical é delimitada pelo jato principal, pela parede lateral direita e pelos defletores menores. Observa-se que a recirculação menor apresenta uma área de influência menor a medida que se aproxima da superfície livre, sendo que no plano mais superficial, o jato abre-se mais em relação aos planos mais próximos ao fundo.

A Figura 4.20 apresenta representações tridimensionais dos vetores de velocidade no tanque de controle. Consegue-se perceber nessas figuras apenas o comportamento bidimensional do escoamento, formado pelo jato principal e as duas grandes zonas de recirculação, que são as características predominantes. A magnitude das velocidades está relacionada com o tamanho dos cones, podendo-se utilizar como referência que os maiores valores encontram-se na região da ranhura.

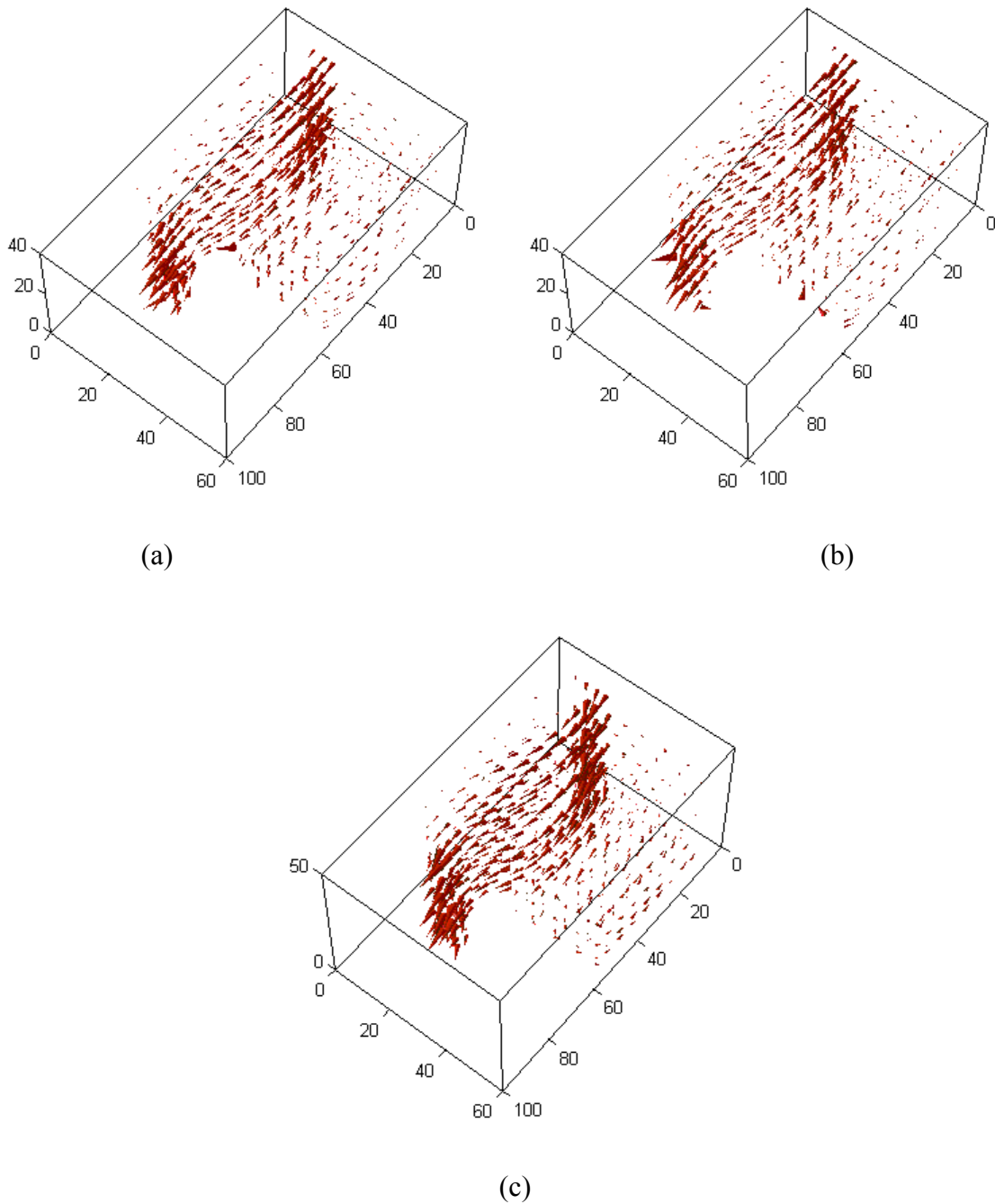


Figura 4.20 – Representação tridimensional dos vetores de velocidade média para:
 (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.4.3 Velocidades na região da ranhura

A região da ranhura representa um ponto crítico na transposição dos peixes pela estrutura por dois motivos: primeiro, porque representa um ponto de passagem obrigatória e segundo, porque nesta região, provavelmente, encontram-se as máximas velocidades. Optou-se em mostrar esses dados na forma de isolinhas de velocidade, em um plano vertical que une os dois septos (pontos da Figura 3.10), conforme apresentado na Figura 4.21. Nesta figura o

mapa de cores indica as componentes horizontais das velocidades na ranhura, decompostas perpendicularmente à seção da abertura. Observa-se, para as três vazões, uma região de velocidades mais elevadas junto ao defletor menor, provavelmente onde o jato principal tem a entrada direta. Próximo à parte interna da ranhura (junto ao septo maior) têm-se velocidades menores, provavelmente porque o escoamento que vem do jato principal perde energia por efeito cisalhante junto ao septo maior, enquanto que o septo menor entra em contato com o jato somente quando este já está passando pela abertura. Observa-se que as máximas componentes ocorrem junto ao fundo e na profundidade correspondente a 10% da altura média do escoamento. Na Figura 4.23 são apresentados os resultados das velocidades resultantes horizontais na ranhura – V_{xy} (sem decompor perpendicularmente à seção da ranhura). Têm-se valores maiores que os observados na Figura 4.21, em média em 7%, não ultrapassando 20%, confirmando a orientação dos vetores de velocidade (Figura 4.8 a Figura 4.10), que não é exatamente perpendicular a seção da ranhura, tendendo para o eixo x, com exceção das medições realizadas junto ao fundo (1 cm do fundo), que tendem para o eixo y.

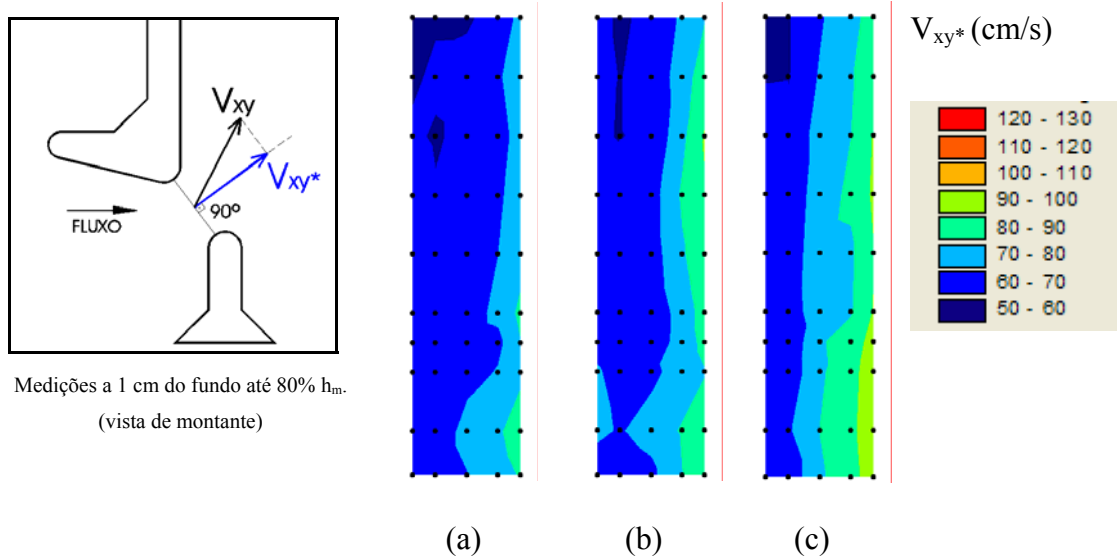
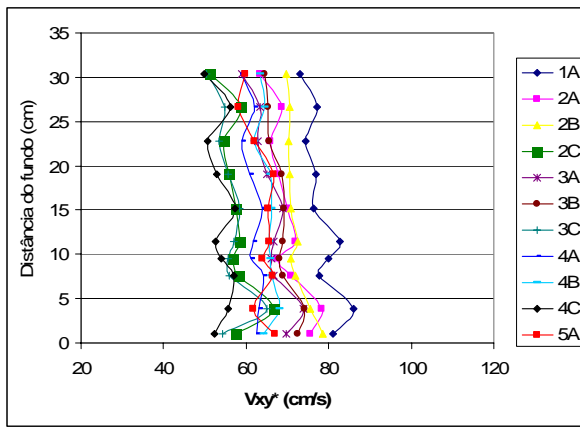
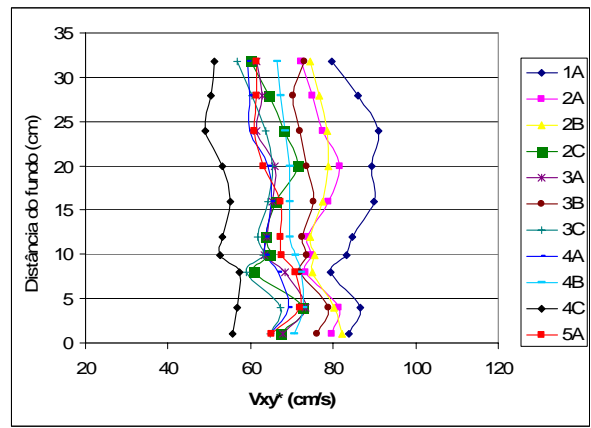


Figura 4.21 – Componentes de velocidades horizontais perpendiculares a ranhura (V_{xy}^*) para: (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

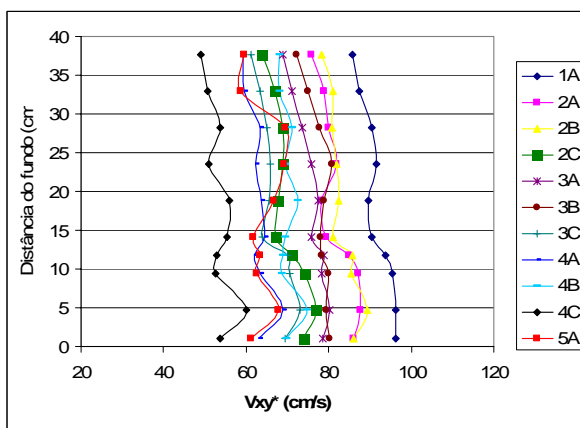
A Figura 4.22 mostra as velocidades na região da ranhura na forma de perfis de velocidade.



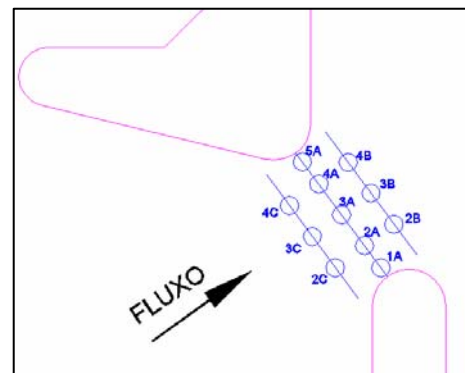
(a)



(b)

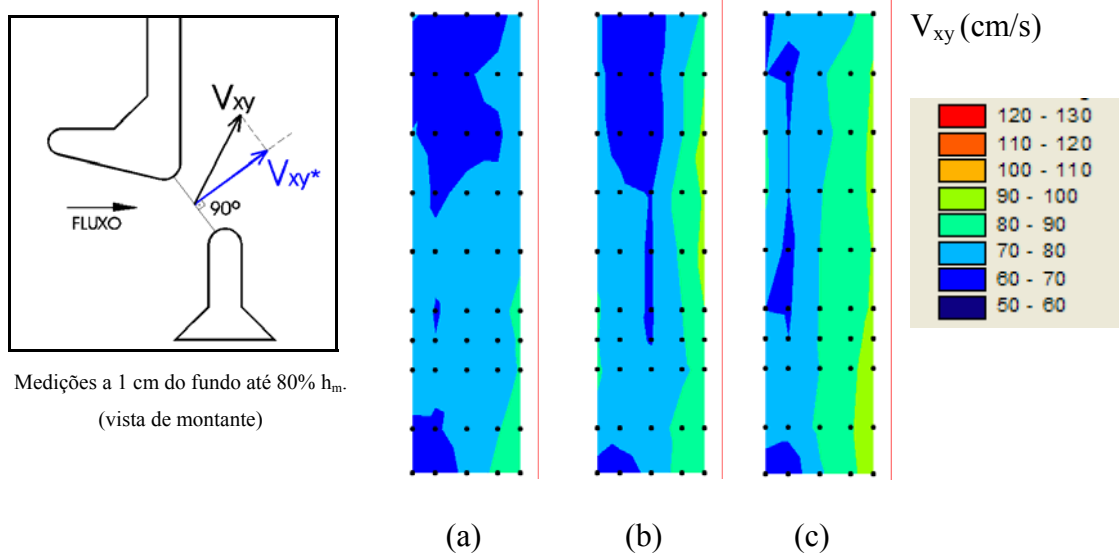


(c)



Esquema da localização dos pontos de medição

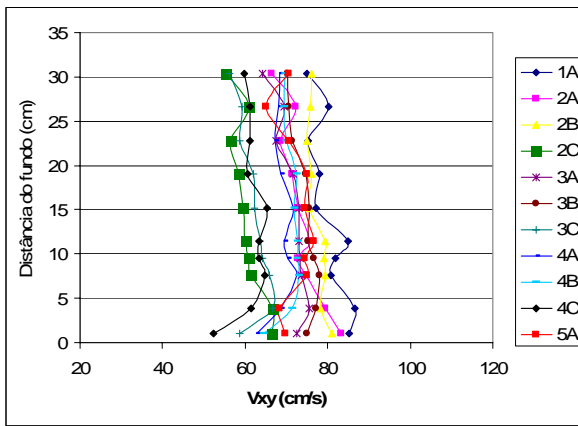
Figura 4.22 – Perfis de velocidades resultantes horizontais na ranhura (V_{xy*}) para: (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.



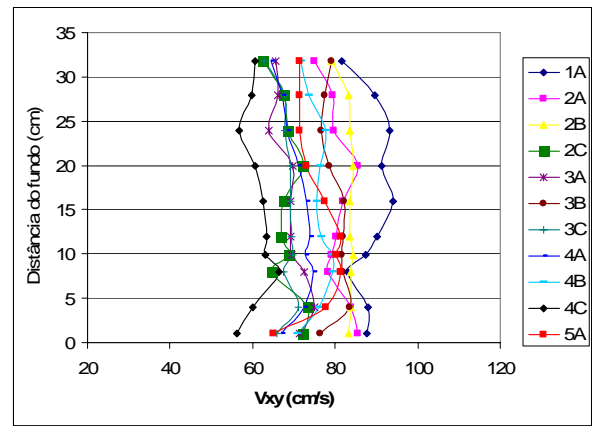
Medições a 1 cm do fundo até $80\% h_m$.
(vista de montante)

Figura 4.23 – Componentes de velocidades resultantes horizontais na ranhura (V_{xy}) para: (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

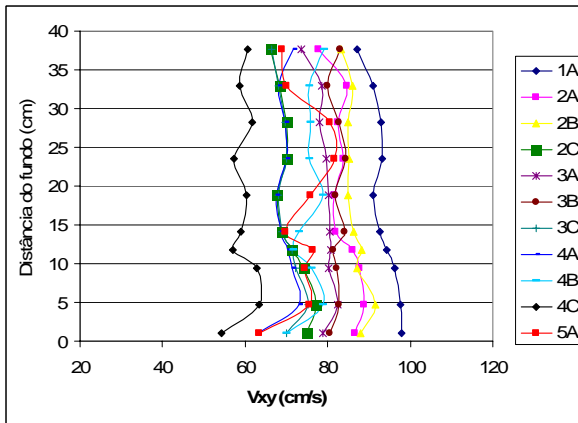
A Figura 4.24 mostra as velocidades na região da ranhura na forma de perfis de velocidade.



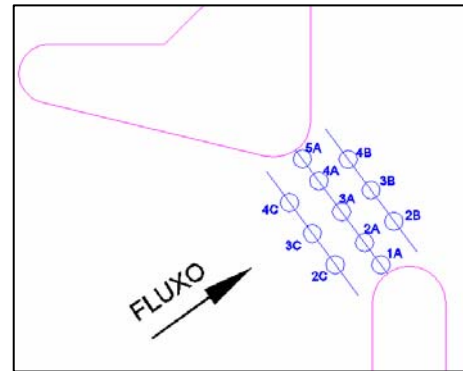
(a)



(b)



(c)



Esquema da localização dos pontos de medição

Figura 4.24 – Perfis de velocidades resultantes horizontais na ranhura (V_{xy}) para:

(a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

A Figura 4.25 mostra as componentes verticais das velocidades na região da ranhura, onde se pode observar que, na maior parte, são desprezíveis (valores entre $-0,10 \text{ m/s}$ e $+0,10 \text{ m/s}$), caracterizando um jato praticamente bidimensional na passagem pela abertura.

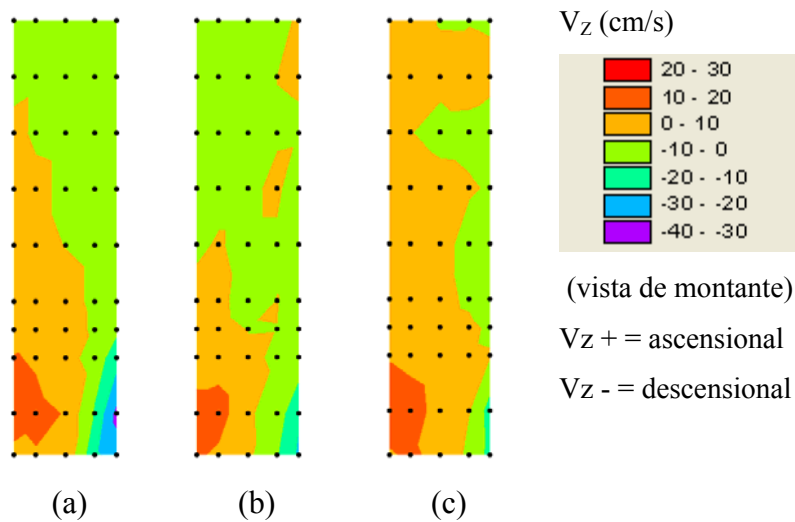


Figura 4.25 – Componentes de velocidades verticais (V_z) na seção da ranhura para:
 (a) $0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

Realizou-se uma análise dos valores das velocidades máximas e mínimas na seção da ranhura, para cada descarga avaliada. Na Tabela 4.2 são apresentados para cada vazão os valores máximos, mínimos e médios das componentes de velocidade horizontal resultantes na ranhura e dos máximos vetores horizontais decompostos perpendicularmente à seção da ranhura.

Observa-se, segundo a Tabela 4.2, que as máximas velocidades aumentam com o aumento da descarga. Geralmente considera-se, simplificada, que a máxima velocidade teórica possa ser avaliada pela velocidade potencial ($V_{\max} = \sqrt{2g\Delta h}$). Sendo Δh constante para uma mesma estrutura em regime uniforme, a máxima velocidade teórica seria igual a $0,84 \text{ m/s}$, enquanto que os valores médios máximos medidos chegam a $0,98 \text{ m/s}$ para a máxima descarga ensaiada, cerca de 16% superior. Portanto, julga-se que esta representação não seria adequada a utilização da velocidade potencial para a definição da velocidade máxima na estrutura, entretanto é um indicativo do seu valor. Na avaliação da velocidade média da seção também se observam valores maiores com o aumento da vazão, enquanto os valores mínimos não demonstraram variar com a descarga.

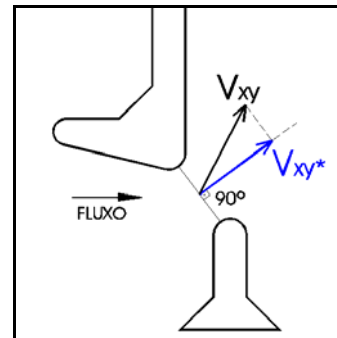
A avaliação da relação das máximas velocidades horizontais perpendiculares (V_{xy*}) à ranhura em relação ao valor médio, na seção da abertura, mostra que os valores máximos excedem, em média, 27% dos valores médios de velocidade. Os valores mínimos horizontais perpendiculares à ranhura (V_{xy*}) representam em torno de 80% dos valores médios da seção.

Avaliando-se as velocidades resultantes horizontais (V_{xy}) na seção da ranhura, têm-se velocidades máximas, aproximadamente, 20% superiores aos valores médios, e os valores mínimos ficam entre 79% e 86% da média.

Através dos valores medidos de velocidades horizontais perpendiculares à seção (V_{xy^*}) e utilizando a equação da continuidade, calculou-se a vazão que passa pela ranhura, comparando-a com a vazão de ensaio. A diferença entre esses dois valores é inferior a 5% nas três descargas ensaiadas, valor considerado satisfatório.

Tabela 4.2 – Velocidades máximas na seção da ranhura (valores de modelo).

| Velocidade | Q (m ³ /s) | | |
|---------------------------------|-----------------------|---------|---------|
| | 0,02165 | 0,02451 | 0,02916 |
| V_{xy} máx (cm/s) | 86,45 | 94,02 | 97,92 |
| V_{xy} méd (cm/s) | 73,25 | 76,82 | 79,96 |
| V_{xy} mín (cm/s) | 62,75 | 64,04 | 63,07 |
| V_{xy^*} máx (cm/s) | 86,03 | 90,91 | 96,34 |
| V_{xy^*} méd (cm/s) | 68,02 | 71,34 | 75,32 |
| V_{xy^*} mín (cm/s) | 58,25 | 59,27 | 58,63 |
| V_{xy} máx / V_{xy} méd | 1,18 | 1,22 | 1,22 |
| V_{xy} mín / V_{xy} méd | 0,86 | 0,83 | 0,79 |
| V_{xy^*} max / V_{xy^*} méd | 1,26 | 1,27 | 1,28 |
| V_{xy^*} mín / V_{xy^*} méd | 0,86 | 0,83 | 0,78 |



Calculou-se o número de Froude na ranhura, considerando a velocidade média perpendicular à seção da ranhura e a profundidade média do escoamento no tanque como dimensão característica, e obteve-se um valor independente da vazão igual a 0,35.

Como este modelo refere-se à geometria da escada para peixes da UHE Igarapava, que foi avaliada em outras pesquisas, a seguir, procura-se comparar os resultados obtidos no presente trabalho com resultados obtidos em estudos anteriores. Viana (2005) realizou medições de velocidade em campo correspondentes às condições da menor descarga avaliada no presente trabalho. Na Tabela 4.3 e na Figura 4.26 comparam-se as máximas velocidades médias medidas na região da ranhura para diferentes profundidades. Nessa tabela os resultados do presente estudo (escala 1:5) são comparados com as medições de protótipo e medições realizadas em um modelo da estrutura na escala 1:20, ambas obtidas do trabalho de Viana (2005). As medições de Viana (2005) foram realizadas no modelo 1:20 com anemometria Laser Doppler e no protótipo com um molinete. Todos os resultados foram transpostos para a escala do protótipo.

Tabela 4.3 – Máximas velocidades médias na seção da ranhura.

| Presente estudo | | Estudo de Viana (2005) | | |
|------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Distância do fundo (m) | Velocidade (m/s) | Distância do fundo (m) | Velocidade (m/s) | |
| | Medições no modelo 1:5* | | Medições no protótipo | Medições no modelo 1:20* |
| | | 1,8 | 1,65 | |
| 1,52 | 1,70 | 1,6 | 1,73 | 0,72 |
| 1,33 | 1,79 | 1,4 | 1,90 | 0,98 |
| 1,14 | 1,69 | 1,2 | 1,65 | 0,85 |
| 0,95 | 1,75 | 1,0 | 1,81 | 1,25 |
| 0,76 | 1,73 | 0,8 | 1,50 | 1,65 |
| 0,57 | 1,90 | 0,6 | 1,09 | 1,52 |
| 0,38 | 1,84 | 0,4 | 1,35 | 1,34 |
| 0,19 | 2,07 | 0,2 | 1,12 | 1,43 |
| 0,05 | 1,99 | | | |

* Todos os valores de velocidade foram transpostos para a escala de protótipo.

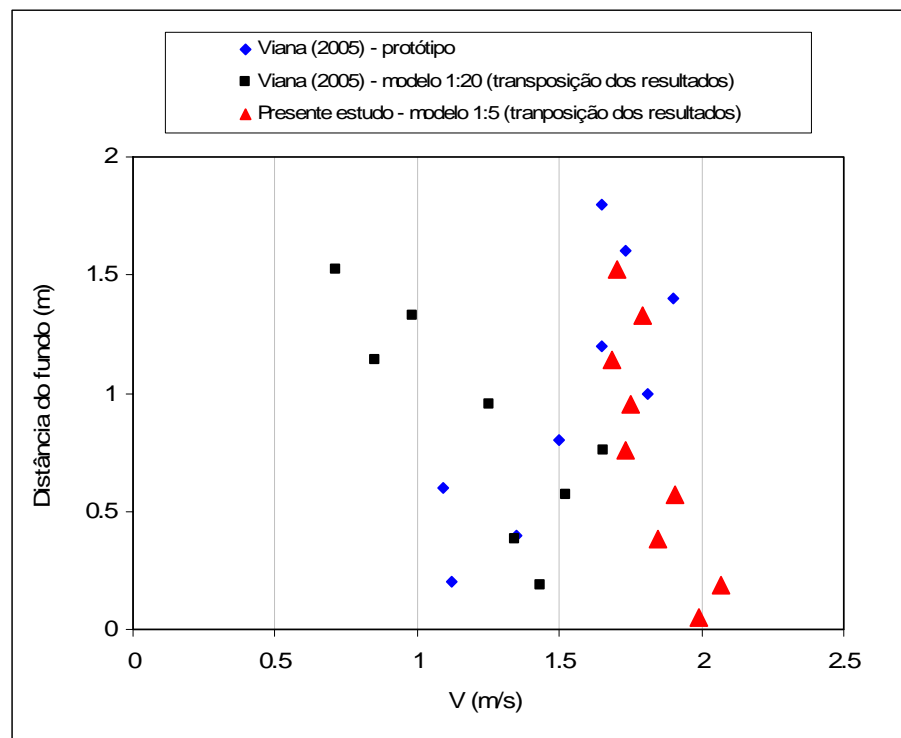


Figura 4.26 – Máximas velocidades médias na seção da ranhura.

Observa-se que os valores máximos de velocidade média na seção da ranhura obtidos no modelo 1:5 e os medidos em protótipo são semelhantes para a metade superior do perfil de

velocidades. Na metade inferior, verifica-se que as medições realizadas no modelo na escala 1:5 são superiores aos valores do protótipo e do modelo 1:20.

Essas diferenças podem ser resultantes de diferentes causas, entre elas:

- efeito de escala – protótipo, escala 1:5 e escala 1:20;
- medições com diferentes tipos de aparelhos: no protótipo foi utilizado um fluxímetro, no modelo na escala 1:5 um ADV e na escala 1:20 um anemômetro a laser;
- diferenças na posição dos pontos de medidas e
- presença de pedras ou outros obstáculos no fundo do protótipo.

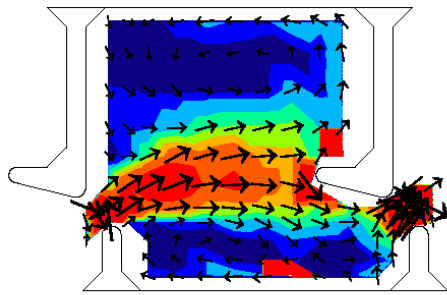
Neste estudo, notou-se que não ocorrem variações significativas das componentes de velocidade para diferentes profundidades em um mesma posição do tanque, não somente na seção da ranhura, mas nas demais regiões.

No presente trabalho, as máximas velocidades médias ocorreram na seção da ranhura, diferente do observado por Viana (2005), onde os máximos valores médios encontraram-se dentro do tanque.

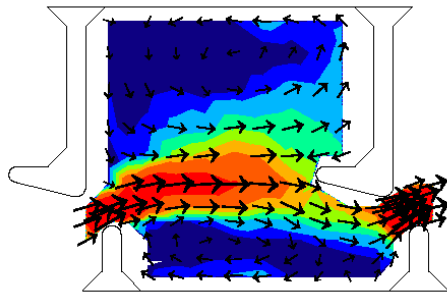
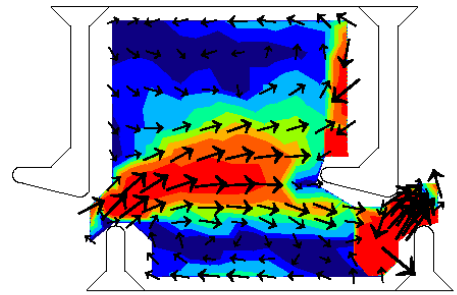
4.2.4.4 Campos de energia cinética média

O conjunto formado pela Figura 4.27, Figura 4.28 e Figura 4.29 mostra o comportamento da energia cinética média, respectivamente para as três descargas ensaiadas, para os cinco planos avaliados. Antes de comentar sobre os resultados, observa-se que os campos que representam os valores para as duas menores vazões, para os planos distantes 1 cm e 10% h_m do fundo, apresentam valores muito elevados nas regiões próximas aos defletores. Provavelmente isso se deve às limitações do equipamento utilizado para a realização de medições próximas a fronteiras, como melhor discutido no Anexo 2.

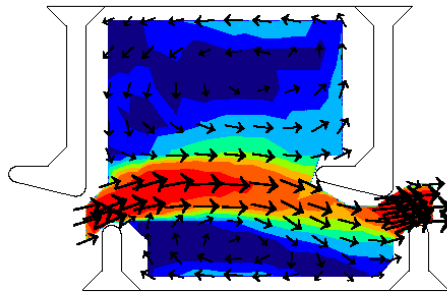
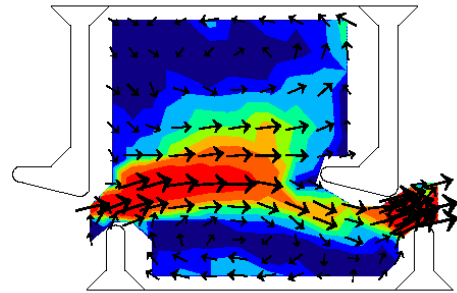
Pode-se dizer que a energia cinética média reflete um valor resultante das velocidades nos três eixos cartesianos, para certo ponto, conforme a equação (4.3). Desta maneira, a representação desses valores, na forma de isolinhas, mostra, de modo geral, o comportamento dos vetores resultantes de velocidade. Observam-se, para todas as vazões e em todos os planos paralelos ao fundo, as diferentes regiões do escoamento: valores maiores de energia cinética média no caminho do jato principal e valores menores nas regiões de recirculação do fluxo. Percebe-se que nos planos distantes do fundo de 1 cm e 10% h_m , os maiores valores delimitam a região do jato principal, que tem uma curvatura maior, tendendo a entrar na região da grande recirculação. Para os demais planos medidos (25% h_m , 50% h_m e 80% h_m), tem-se definido o jato principal por um caminho mais direto entre ranhuras consecutivas. Esse comportamento concorda com as observações já realizadas durante a avaliação dos campos de velocidade, onde se percebe que na região da recirculação maior (de eixo vertical) há uma recirculação secundária, com menores velocidades, de eixo transversal no sentido ascensional junto ao defletor de jusante do tanque de controle. Ou seja, essa recirculação mais lenta (com vetores de menor magnitude em relação à recirculação de eixo vertical) é alimentada pela porção do jato principal que entra no tanque pela parte inferior, que então encontra uma barreira (defletor), e tem a tendência, além de recircular pelo tanque em planos horizontais, de provocar uma recirculação de eixo transversal na região central da recirculação maior.



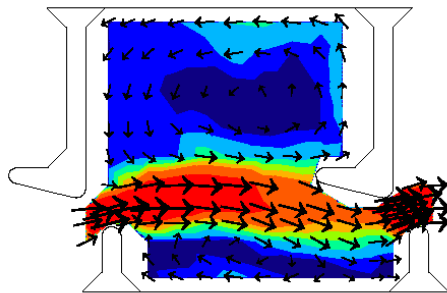
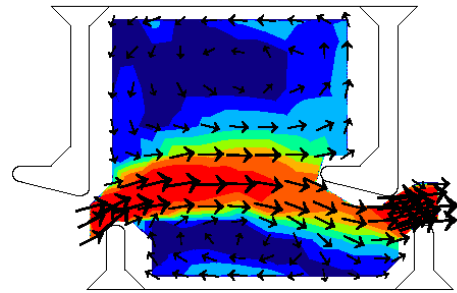
1 cm



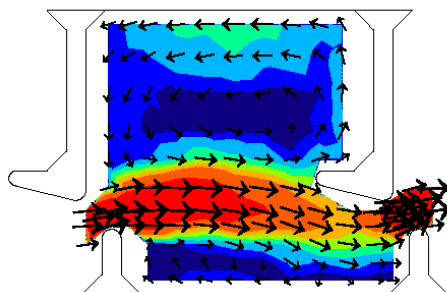
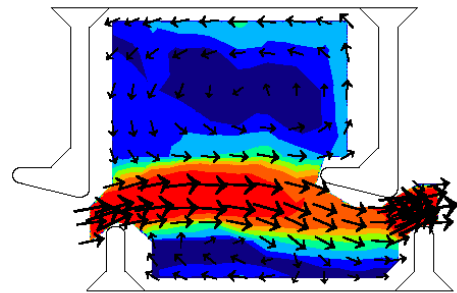
$10\%h_m$



$25\%h_m$



$50\%h_m$



$80\%h_m$

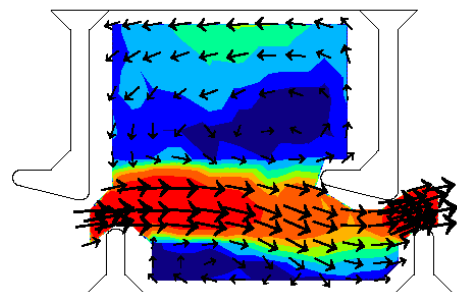


Figura 4.27 – Campo de energia cinética média para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.28 – Campo de energia cinética média para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

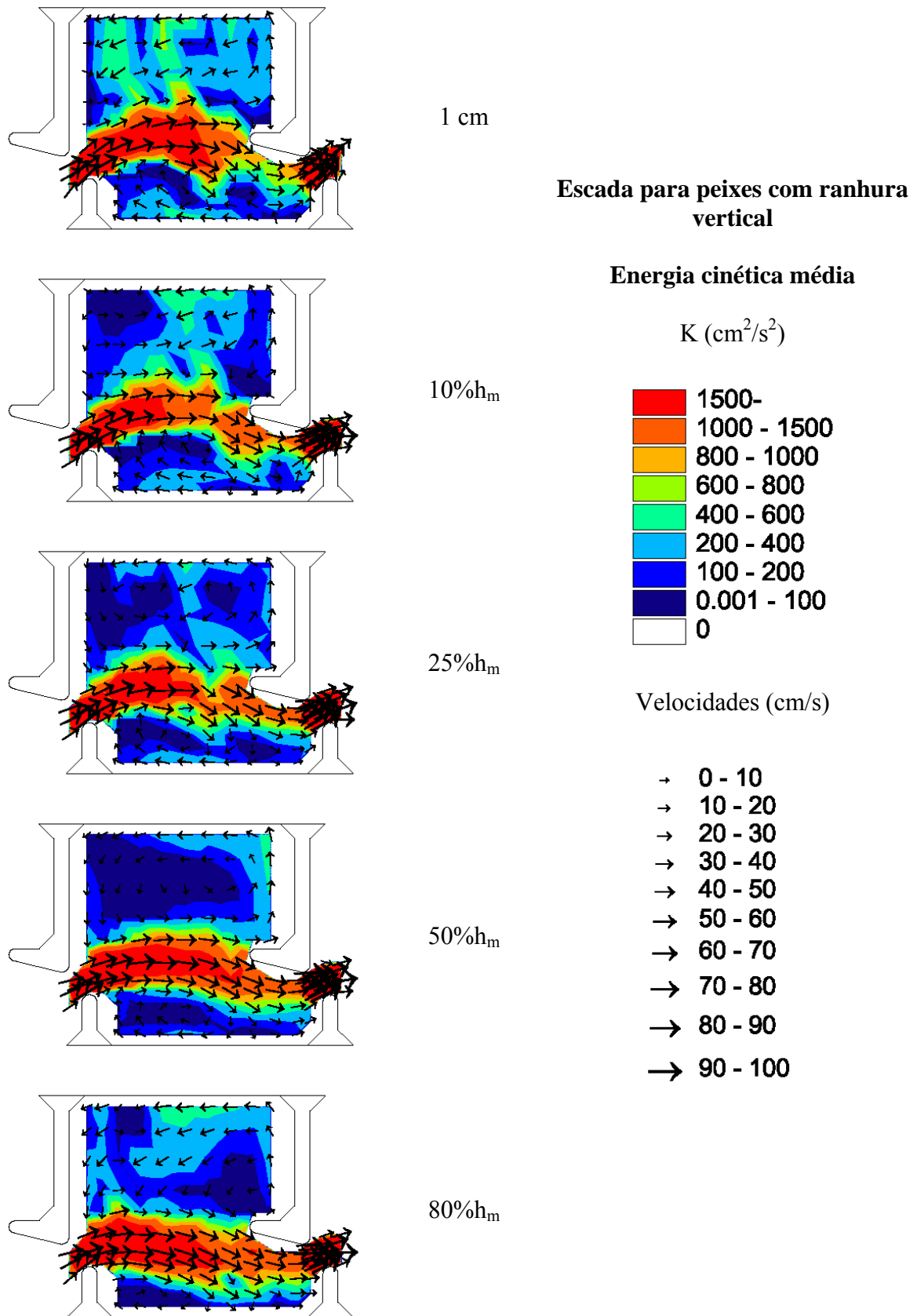


Figura 4.29 – Campo de energia cinética média para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

Como uma tentativa de comparar os campos de energia cinética média para as diferentes vazões, além da avaliação visual, foi calculado, para cada plano de medição, um valor médio deste parâmetro. A Figura 4.30 mostra os valores médios de energia cinética média para os diferentes planos e vazões. Observa-se que para os diferentes planos paralelos ao fundo, com exceção do plano mais próximo ao fundo, os valores médios de energia cinética média, para as diferentes vazões, apresentam um mesmo comportamento, com valores maiores associados a planos mais próximos da superfície. O valor médio desse parâmetro no plano mais superficial (80%h_m) é 20% superior ao valor correspondente ao plano situado a 10%h_m. O aumento da vazão parece não estar associado ao aumento do valor médio da energia cinética média, embora, para a menor descarga avaliada, os valores sejam inferiores. Os valores para as outras duas vazões estão muito próximos.

O comportamento dos valores médios para o plano distante 1 cm do fundo reflete as dificuldades de medições em regiões próximas a fronteiras, como comentado anteriormente, sendo que esses valores provavelmente estão superestimados.

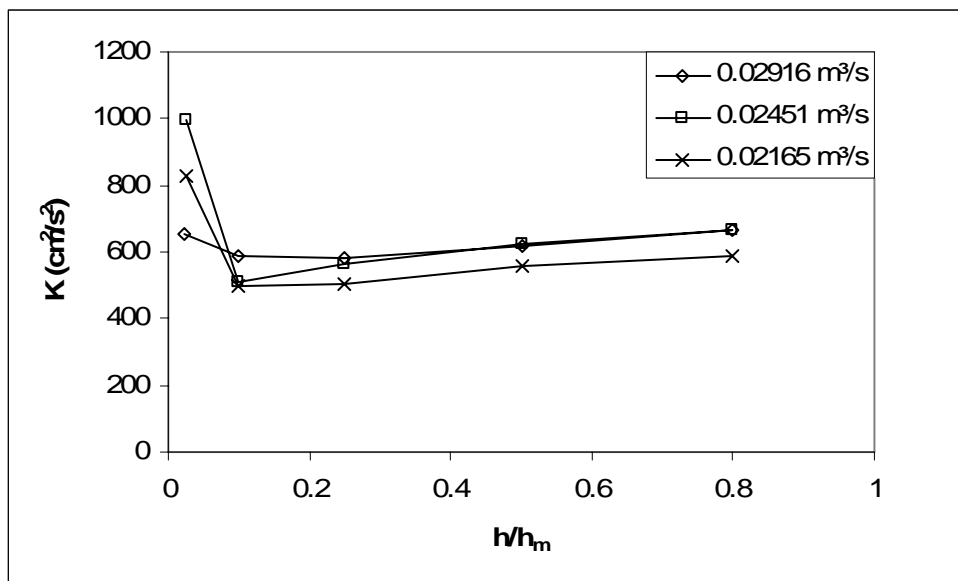


Figura 4.30 – Valores médios de energia cinética média para cada plano paralelo ao fundo.

Pode-se avaliar a energia cinética média no protótipo, seja o valor médio em um plano ou a distribuição dos valores no plano, para esta estrutura, considerando a lei de similitude de Froude e os resultados apresentados nas figuras anteriores. A equação (4.7) fornece a relação entre os valores de energia cinética do modelo e do protótipo.

$$\frac{K_p}{K_\lambda} = \lambda \tag{4.7}$$

Onde: K_p e K_λ são os valores de energia cinética média, no protótipo e no modelo, respectivamente e λ é a escala de redução geométrica do modelo.

A seguir apresentam-se os resultados de energia cinética média na seção da ranhura. Observou-se nos planos paralelos ao fundo que nesta região encontram-se valores elevados, e por este motivo, a seguir serão apresentados com outra escala de cores, para poder mostrar como se desenvolvem as variações nessa seção. Observa-se que seguindo o comportamento das componentes de velocidade nesta região, apresentado na Figura 4.23, têm-se valores maiores de energia cinética média próximo ao defletor menor (lado direito na vista de montante), onde o jato incide diretamente, conforme descrito na avaliação das velocidades. Embora o valor médio em cada plano da energia cinética média, apresentado na Figura 4.30, não indique variações significativas com o aumento da vazão, aqui, na seção da ranhura, observa-se que há um aumento dos valores desse parâmetro com o aumento da vazão. Provavelmente, no momento em que se avalia o valor médio de todo o tanque, essas variações são distribuídas e por isso não ficam evidentes; embora na região da ranhura possa existir uma influência localizada da vazão na avaliação deste parâmetro.

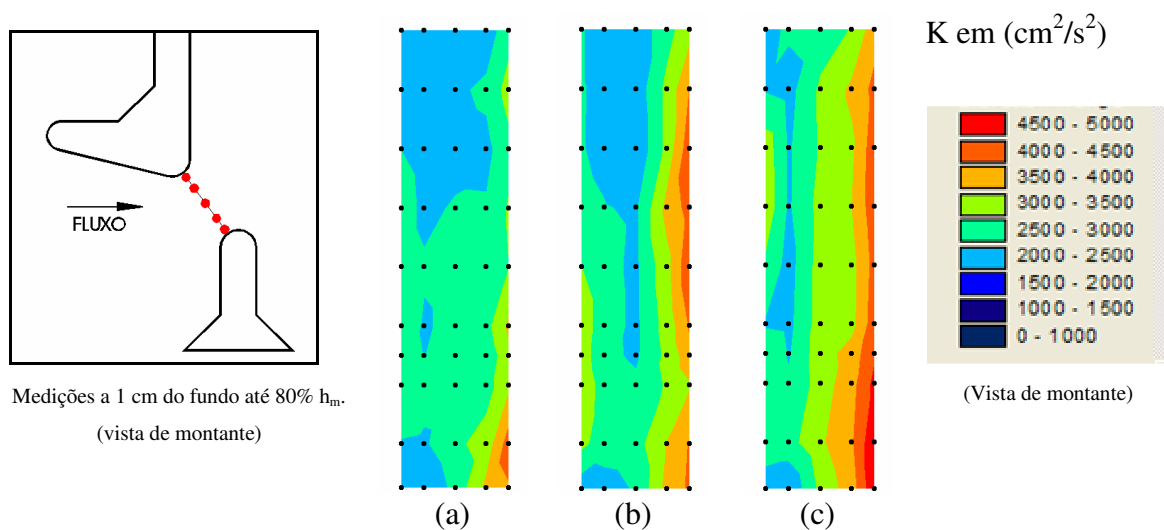


Figura 4.31 – Campo de energia cinética média na seção da ranhura para (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.4.5 Campos de energia cinética da turbulência

Enquanto a energia cinética média está ligada às componentes médias de velocidade nas três direções, a energia cinética da turbulência representa as flutuações temporais dos valores de velocidade, de acordo com a Equação (2.41).

A Figura 4.32, a Figura 4.33 e a Figura 4.34 apresentam os campos de energia cinética da turbulência em planos paralelos ao fundo, para as três vazões ensaiadas. Nessas

figuras observa-se que os campos correspondentes às medições distantes 1 cm do fundo provavelmente apresentam resultados comprometidos, devido às limitações que se tem ao utilizar o medidor de velocidades ADV muito próximo da fronteira sólida, conforme é mais bem avaliado no Anexo 2.

No Anexo 5 apresentam-se os campos de energia cinética da turbulência adimensionalizados em função da velocidade potencial ($k^{0,5}/V_p$).

Os campos de energia cinética da turbulência representam muito bem a separação de duas zonas principais: a região do jato principal e as duas regiões de recirculação. Em todos os planos (com ressalvas próximo ao fundo) observa-se claramente o caminho do jato principal, caracterizado por valores mais elevados de energia cinética da turbulência. Percebe-se que ao se afastar do fundo, uma mesma faixa de valores de energia cinética da turbulência abrange uma região maior no caminho do jato principal, como se o jato principal tivesse uma área de influência maior ao se aproximar da superfície.

Pena (2004) avaliou os campos de energia cinética da turbulência em escadas para peixes com ranhuras verticais (Figura 2.36). Para tanques com largura de 1,00 m, comprimento 1,20 m, declividade de 5% e ranhura com 0,16 m, observaram-se valores entre 100 e 3000 cm^2/s^2 , para a vazão de 0,075 m^3/s . Considerando a escala de transposição de resultados pelos critérios de semelhança de Froude, onde a transferência de resultados da energia cinética da turbulência é linear, pode-se considerar que os resultados apresentados aqui são compatíveis com os de Pena (2004), inclusive na distribuição dos mesmos dentro dos tanques. Apesar das diferenças da geometria em uma aproximação inicial, considerando que o presente modelo apresenta a abertura com metade da dimensão da estrutura de Pena, observa-se que os maiores valores de energia cinética da turbulência deste estudo, em torno de 1500 cm^2/s^2 apresentam a mesma escala de redução da abertura.

Liu (2004) observou que a energia cinética da turbulência em uma escada para peixes com ranhura vertical (geometria 18 da Figura 2.34), com tanques com largura de 0,91 m, comprimento 1,14 m, declividades de 5,06% e 10,54% e ranhura com 0,114 m, apresentou em todos os ensaios valores inferiores a 8% do quadrado da velocidade máxima na ranhura. No presente estudo, estimam-se valores máximos da ordem de 10% do quadrado da velocidade máxima na ranhura, desconsiderando as medições realizadas nas posições no plano a 1 cm do fundo, cujos resultados, mesmo após a aplicação do filtro, indicam valores de energia cinética da turbulência mais elevados em pontos isolados, caracterizando os já mencionados problemas no processo de medição.

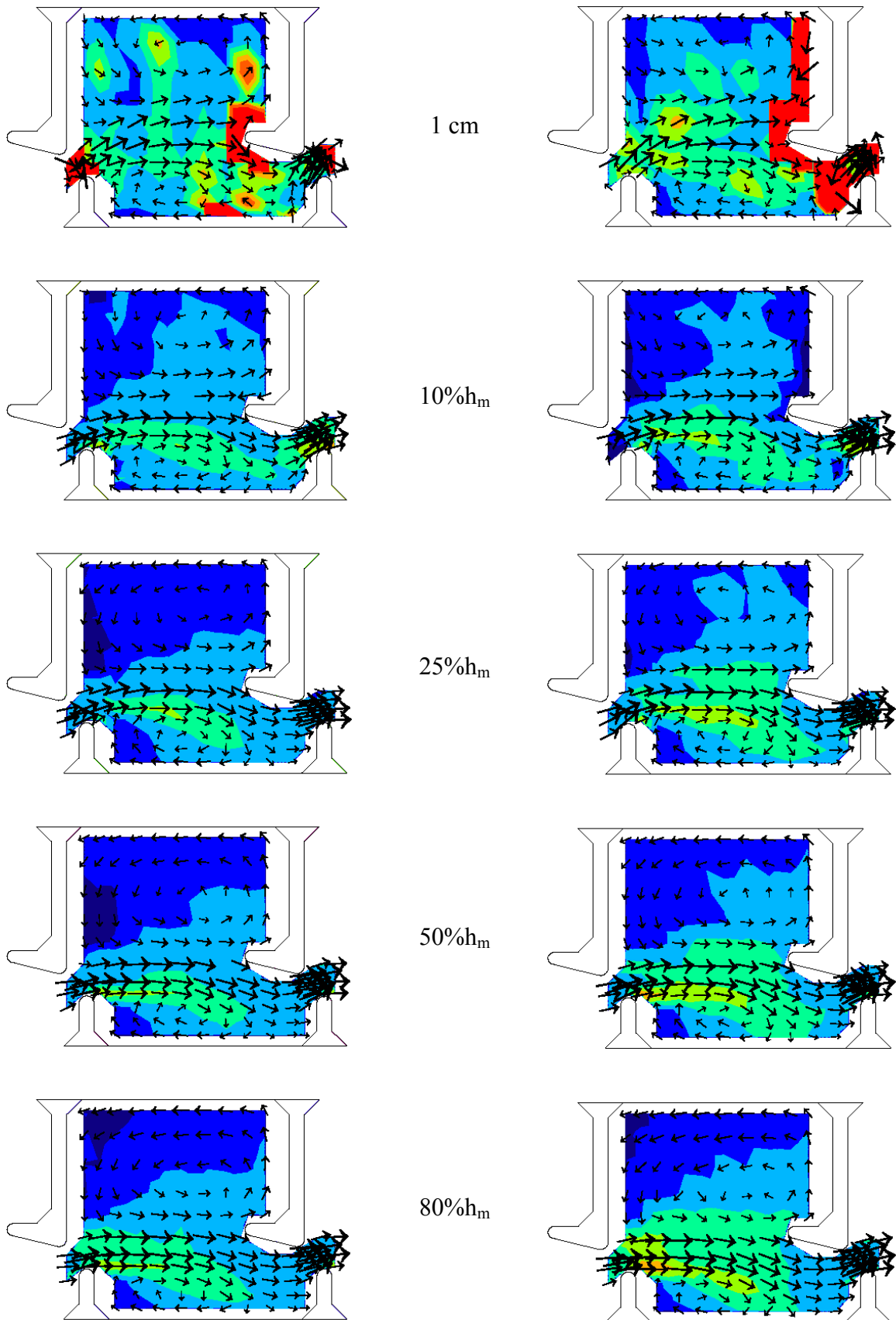


Figura 4.32 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.33 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

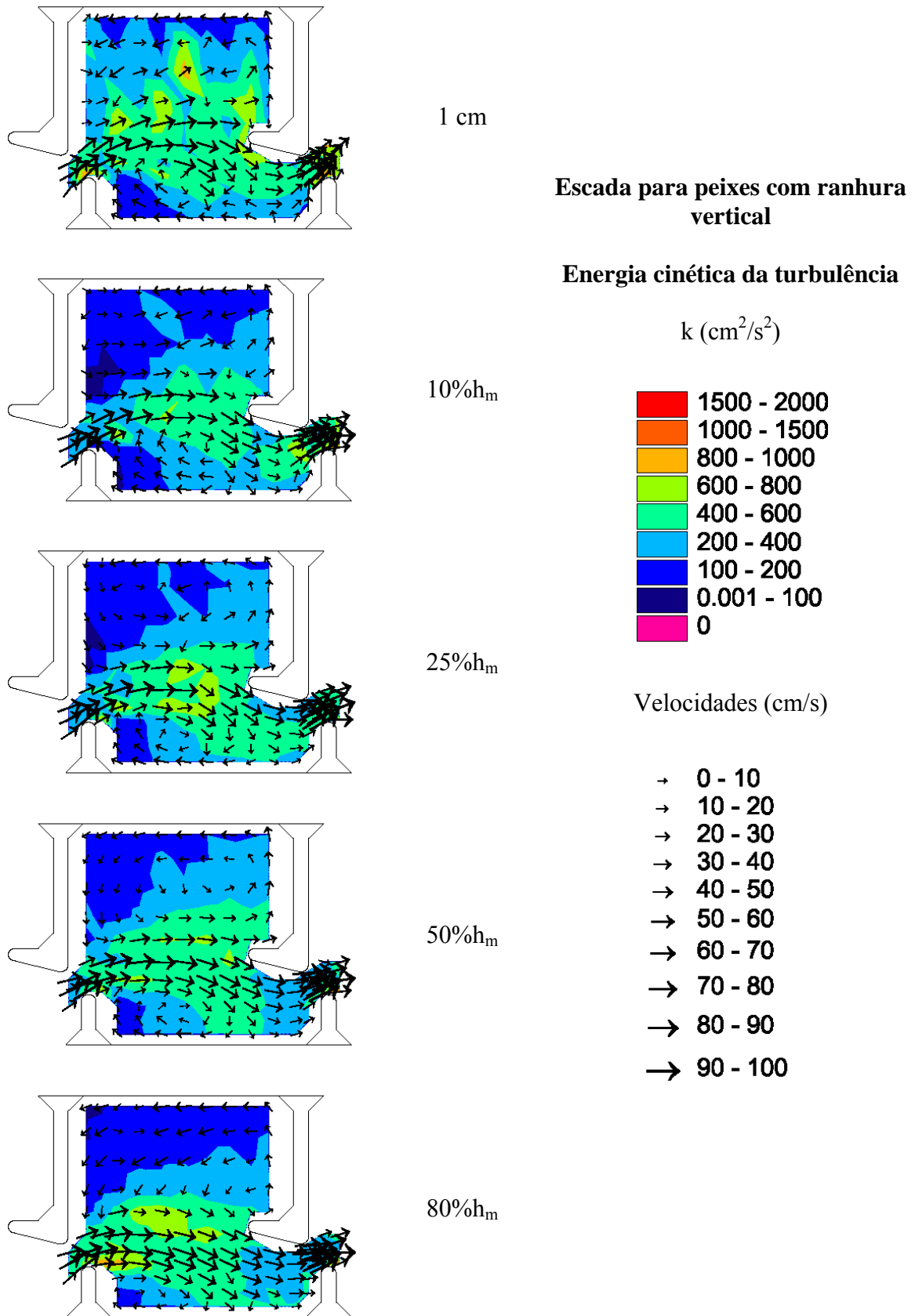


Figura 4.34 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

Do mesmo modo que se procedeu na avaliação da energia cinética média, foram calculados os valores médios em cada plano de energia cinética da turbulência. A Figura 4.35 mostra os valores médios desse parâmetro para os diferentes planos e vazões. Verifica-se que há uma tendência do aumento do valor médio da energia cinética da turbulência para os planos mais distantes do fundo.

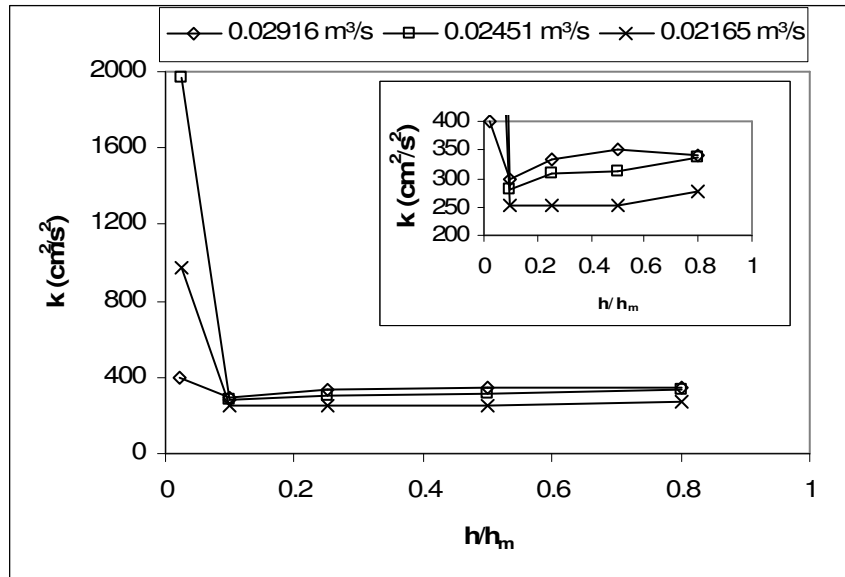


Figura 4.35 – Valores médios de energia cinética da turbulência para cada plano paralelo ao fundo.

A Figura 4.36 mostra os campos de energia cinética da turbulência na seção da ranhura. Como observado nos resultados de velocidade e da energia cinética média, têm-se valores maiores de energia cinética da turbulência junto ao defletor menor e mais próximo do fundo. Para a maior vazão ensaiada (Figura 4.36-c) há uma região junto ao fundo com menores valores para esse parâmetro.

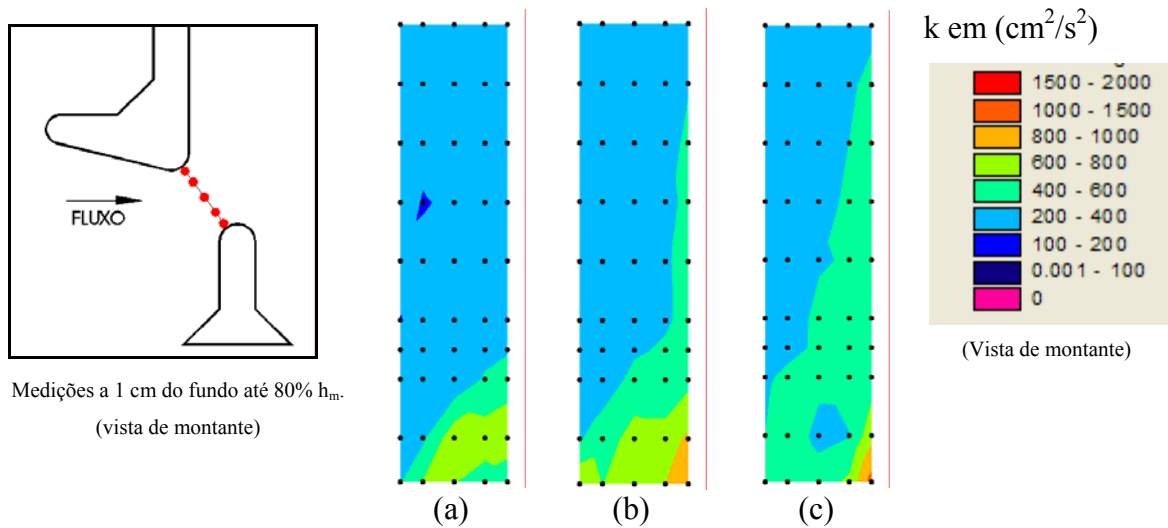


Figura 4.36 – Campo de energia cinética da turbulência na seção da ranhura para: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.4.6 Campos de intensidades da turbulência

Os mapas apresentados na Figura 4.37, Figura 4.38 e Figura 4.39 representam o comportamento da intensidade da turbulência nos planos paralelos ao fundo, para as três vazões ensaiadas. A intensidade da turbulência é dada pelo quociente entre a média quadrática das flutuações de velocidade (representada pelo desvio padrão) e o valor médio temporal. Geralmente os valores da intensidade da turbulência são menores nas regiões das velocidades de maior magnitude e mais significativos nas regiões de recirculação do escoamento. Isso porque nas regiões de recirculação, onde as velocidades médias são menores, estas se tornam pouco expressivas em relação às flutuações de velocidades, que em alguns casos são maiores que o valor médio. As regiões de recirculações, onde os valores de intensidade da turbulência são elevados, caracterizam-se por escoamentos de pequeno deslocamento, mas com agitação constante, enquanto que na região do jato, tem-se um escoamento de sentido preferencial, de velocidades mais elevadas e menores flutuações relativas.

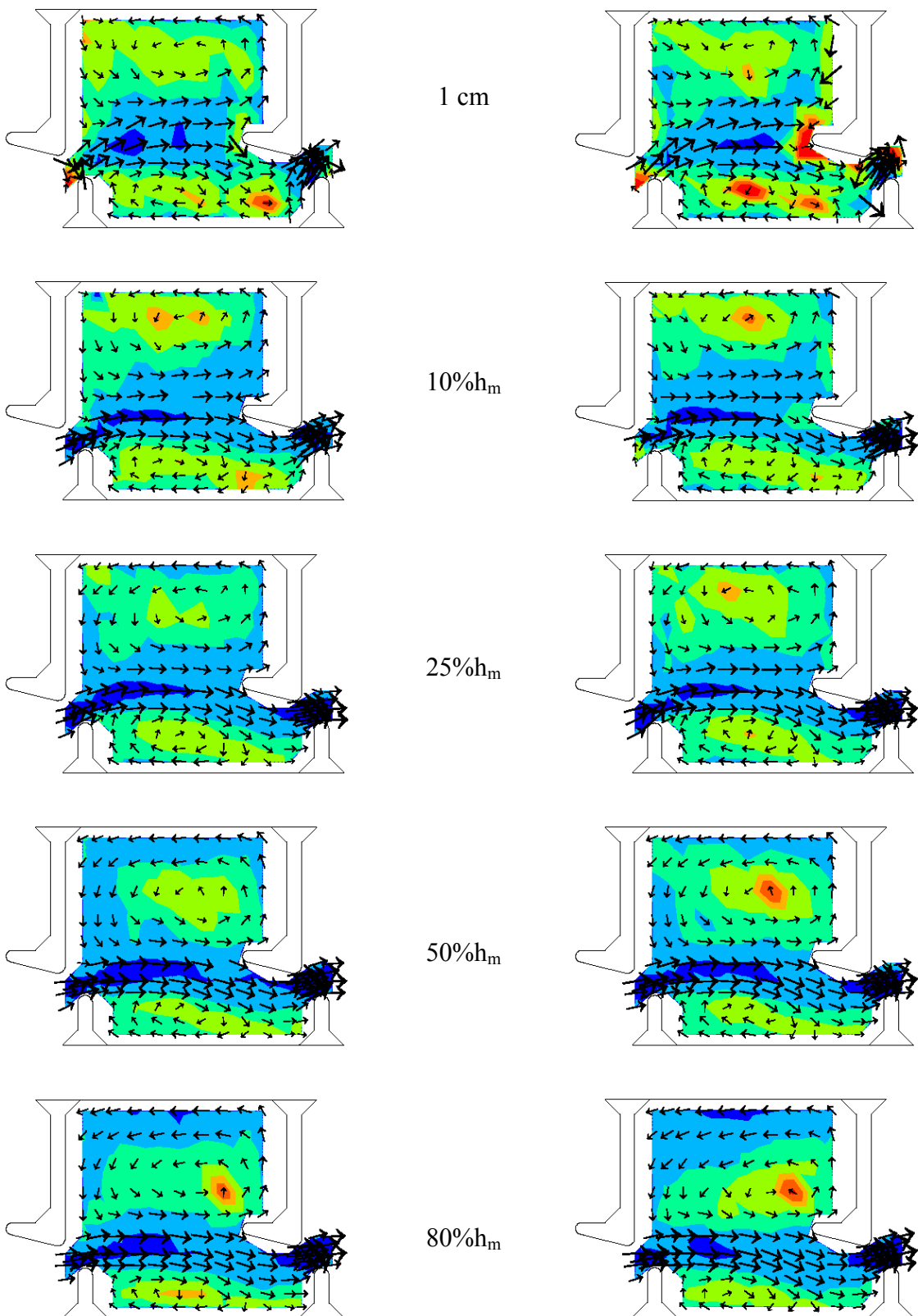


Figura 4.37 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.38 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

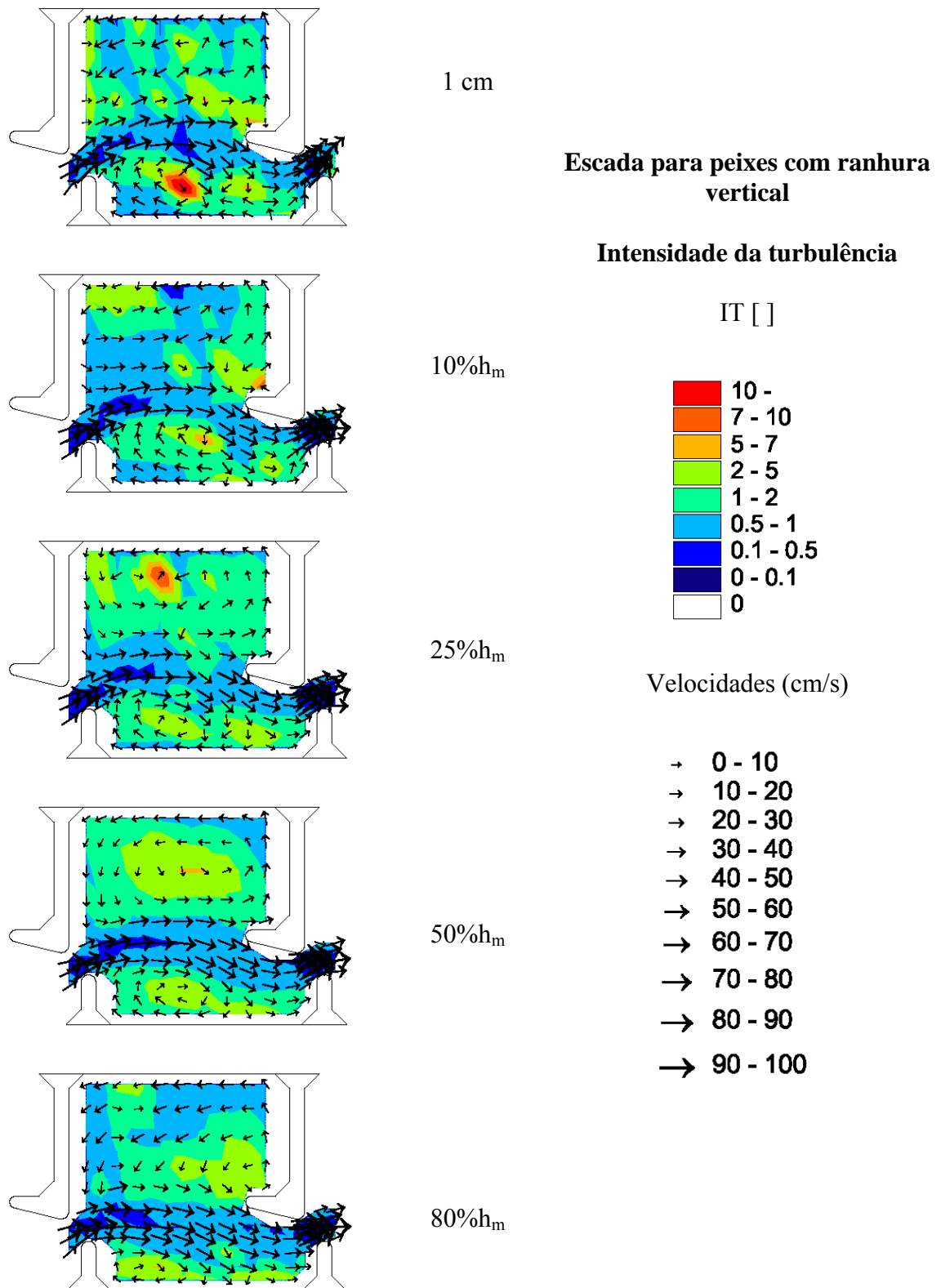


Figura 4.39 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

A Figura 4.40 apresenta os valores médios de intensidade da turbulência para cada plano, para as diferentes vazões. Observa-se que os valores médios da intensidade da turbulência para os planos situados a 1 cm do fundo são maiores em relação aos demais planos, que apresentam um comportamento praticamente constante, independente da profundidade e da vazão.

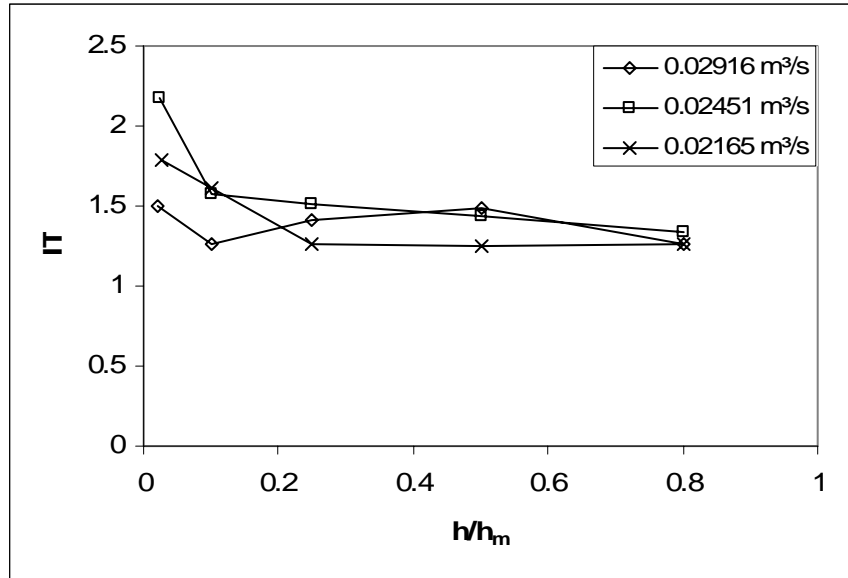


Figura 4.40 – Valores médios de intensidade da turbulência para cada plano paralelo ao fundo.

A Figura 4.41 apresenta o comportamento da intensidade da turbulência na seção da ranhura em uma escala de cores mais detalhada. Observa-se que na maior parte da área têm-se valores de intensidade da turbulência entre 0,3 e 0,4. Próximo ao fundo, ocorrem valores mais elevados, como observado na Figura 4.40, no comportamento médio de cada plano. Esses pontos próximos ao fundo provavelmente apresentam resultados comprometidos, pelas limitações das medições a partir do efeito Doppler junto às fronteiras, como comentado anteriormente.

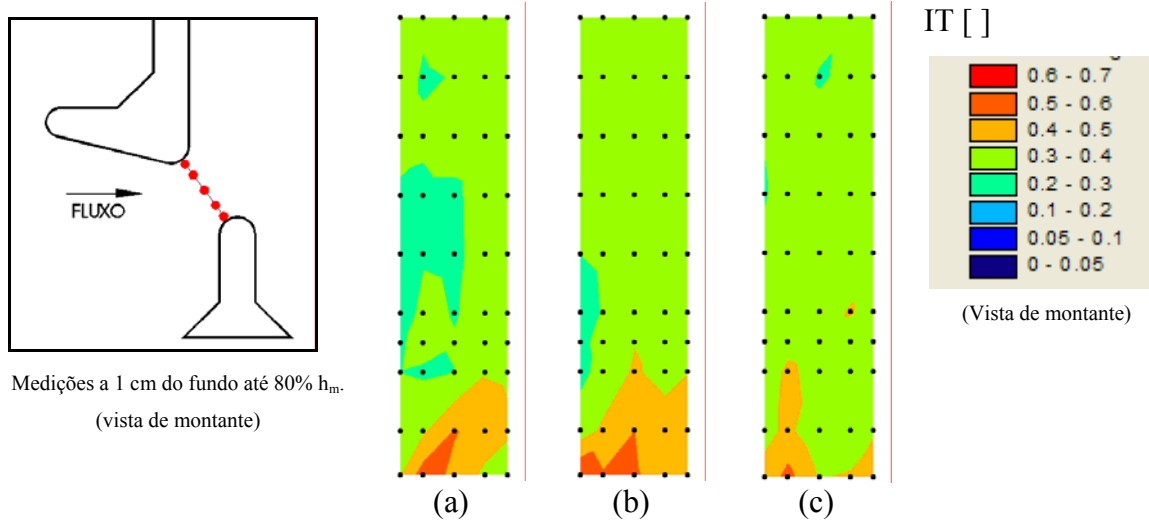


Figura 4.41 – Campo de intensidades da turbulência na seção da ranhura para: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.4.7 Campos de tensões de Reynolds

Neste trabalho procura-se definir o comportamento das tensões de Reynolds atuantes no plano xy, que representa o plano de maiores valores deste parâmetro para esse tipo de escoamento.

Na Figura 4.42, Figura 4.43 e Figura 4.44 estão representados os campos das tensões de Reynolds nos planos paralelos ao fundo (plano xy). Como já observado na avaliação de outros parâmetros, como energia cinética da turbulência e intensidade da turbulência, tem-se que os resultados obtidos para o plano mais próximo ao fundo apresentam resultados de magnitude superestimada, conforme analisado no Anexo 2. Para as demais profundidades, e mesmo no plano próximo ao fundo, excluindo alguns pontos, tem-se um comportamento padrão das tensões de Reynolds no plano xy. Esse comportamento pode ser descrito por valores mais elevados na passagem pela ranhura, direcionando-se para a próxima abertura, preenchendo parte da recirculação menor. Adjacente a esses valores elevados, tem-se uma pequena região de transição, com valores menores, e logo uma outra região de grandes magnitudes de tensões de Reynolds, no entanto, de sentido contrário. Na região da grande recirculação, a maior parte da área apresenta valores entre (-5 N/m^2) e zero. Esse fato confirma que na região da grande recirculação têm-se as melhores condições para o descanso dos peixes. As maiores magnitudes das tensões de Reynolds observadas chegam a 30 N/m^2 , ocorrendo em pequenas regiões. Considerando o caminho do jato principal, pode-se dizer que, na maior parte do tempo, o peixe teria que conviver com valores de tensão de Reynolds entre 5 e 20 N/m^2 .

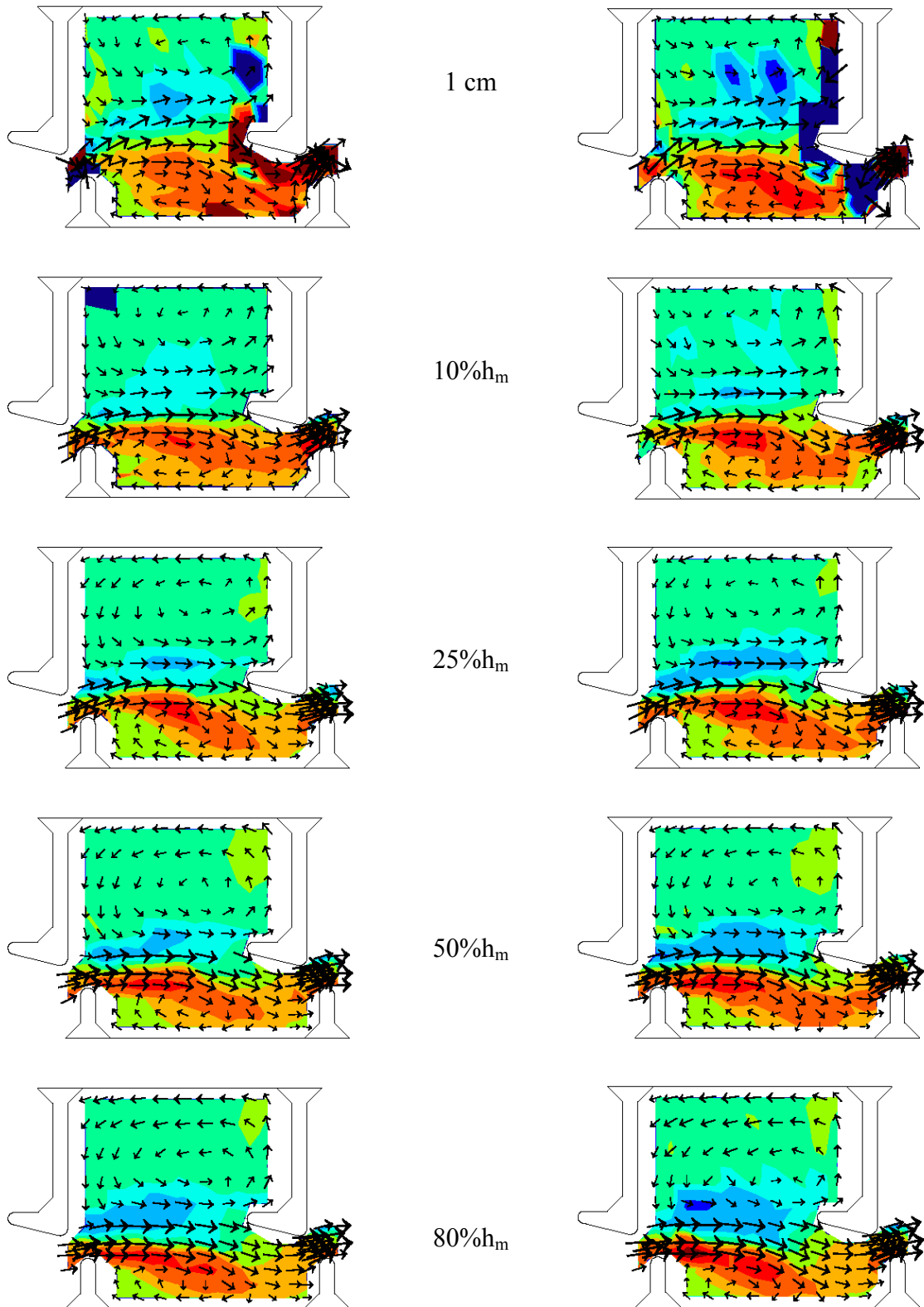


Figura 4.42 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.43 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

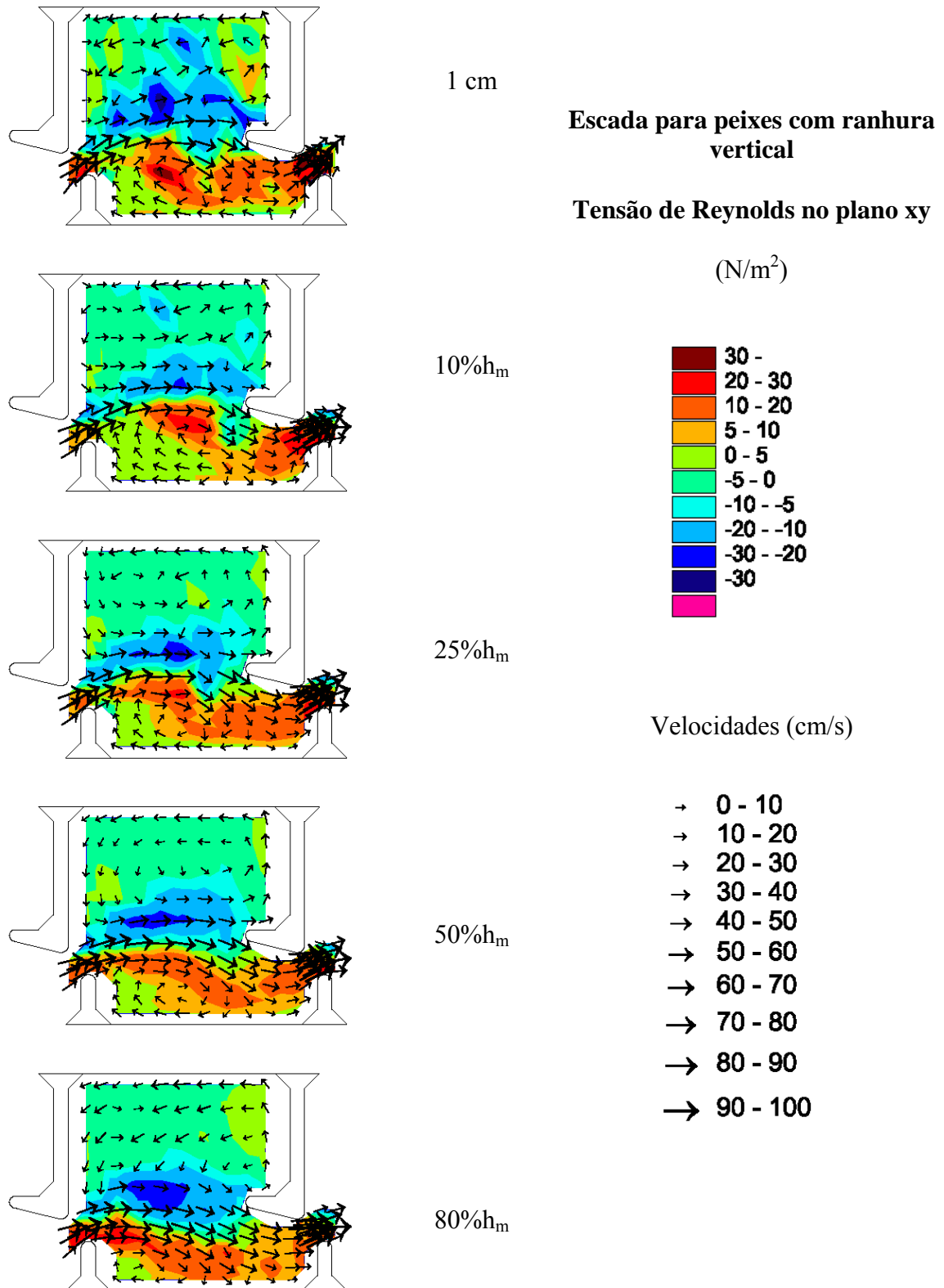


Figura 4.44 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com ranhura vertical, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

Da mesma maneira que se procedeu na avaliação dos demais parâmetros da turbulência, a Figura 4.45 apresenta os valores médios da tensão de Reynolds no plano xy, para cada um dos planos e diferentes vazões. Esses valores ficam, na grande maioria, entre -1 e 1 N/m², sem identificar-se um comportamento associado às profundidades ou descargas, para as situações investigadas.

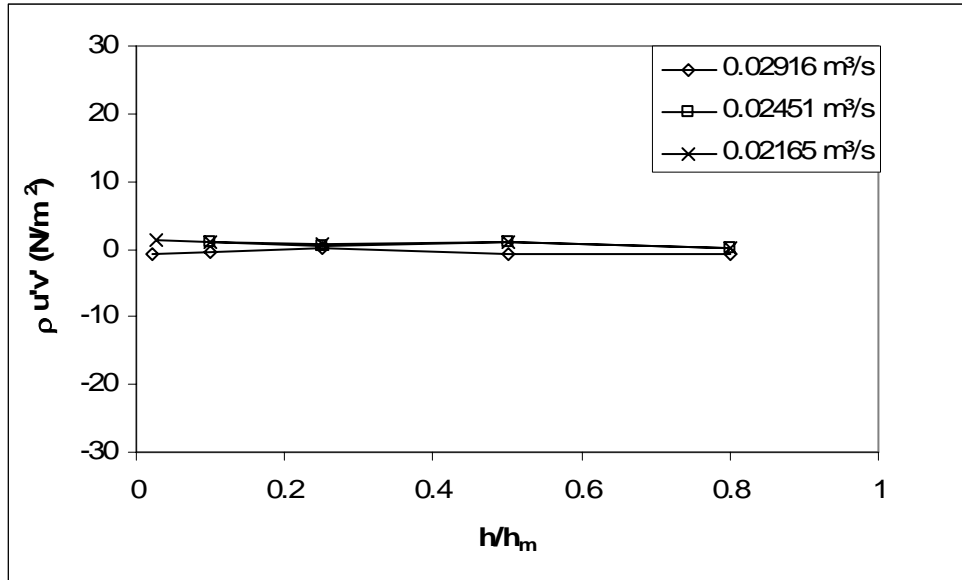


Figura 4.45 – Valores médios das tensões de Reynolds no plano xy para cada plano paralelo ao fundo.

A Figura 4.46 apresenta como se comportam as tensões de Reynolds no plano xy, na seção da ranhura. Confirma-se o mesmo fato observado nos planos paralelos ao fundo, onde os valores do jato principal ficam, na grande maioria, entre 5 e 20 N/m². Junto ao fundo os valores são maiores, chegando a exceder 30 N/m², mas conforme as limitações da medição pelo efeito Doppler próximo as fronteiras, acredita-se que esses valores estão superestimados. Observa-se, concordando com as magnitudes da velocidade e dos demais parâmetros turbulentos, que as tensões de Reynolds são maiores junto ao defletor menor, correspondendo à região de choque direto do jato principal, enquanto que do lado do defletor maior, estes valores são atenuados.

A transposição dos valores das tensões de Reynolds para os valores correspondentes de protótipo pode ser realizada considerando os critérios de similitude de Froude, pela equação (4.8).

$$\frac{(-\rho \cdot u' \cdot v')_p}{(-\rho \cdot u' \cdot v')_\lambda} = \lambda \quad (4.8)$$

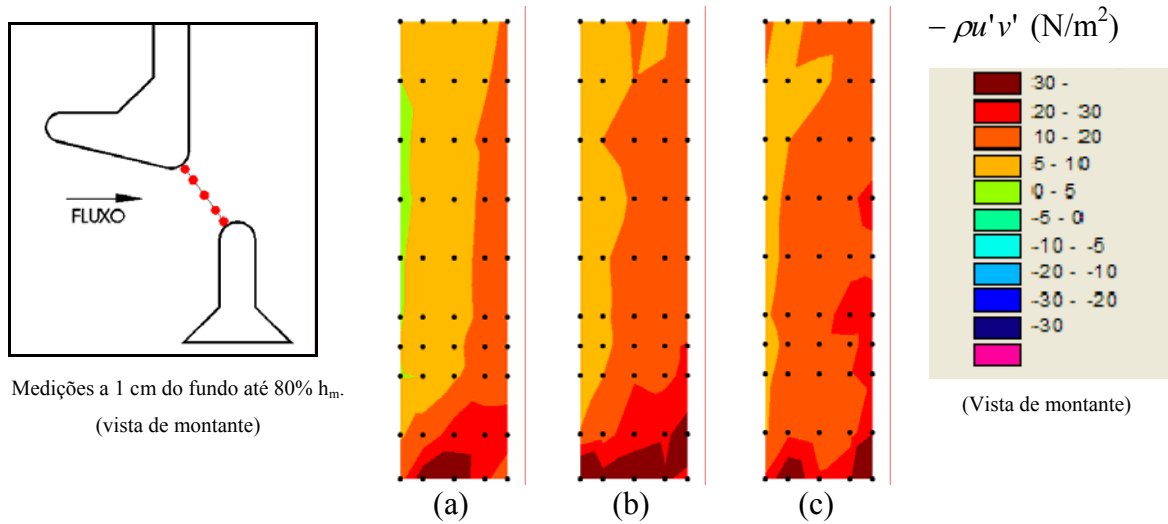


Figura 4.46 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy na seção da ranhura para:
(a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.5 Comportamento da Ictiofauna Associado às Características Hidráulicas

Vários requisitos são exigidos com o objetivo de tornar os projetos de escadas para peixes mais eficientes. Neste trabalho o enfoque está na verificação de condições hidráulicas dentro dos tanques de uma escada para peixes que estejam em harmonia com a capacidade natatória das espécies migratórias.

Como já comentado, o modelo de escada para peixes com ranhura vertical avaliada neste trabalho representa, em escala, um trecho da estrutura construída na UHE de Igarapava (Anexo 1). Essa escada de peixes vem sendo monitorada desde a sua implantação em 1999, onde, através de uma janela de controle, instalada próxima à saída da estrutura a montante, são verificadas as espécies de peixes que têm utilizado o sistema de transposição.

O ideal é que sejam realizados estudos biológicos que informem as capacidades natatórias de determinadas espécies, bem como os limites de aceitação de determinados indicadores da turbulência do escoamento. Sabe-se que no Brasil, a diversidade de espécies de peixes é muito grande, e têm-se poucas informações que possam ser utilizadas como parâmetros no projeto de MTP. Aqui, uma vez tendo sido testadas as vazões mínima e máxima do projeto, verifica-se uma maneira de relacionar a aceitação de algumas espécies de peixes observadas na estrutura com os valores medidos em laboratório no modelo da escada. Possivelmente, esses indivíduos apresentarão o mesmo nível de aceitação em estruturas que apresentem valores da mesma ordem de grandeza de velocidades médias e parâmetros da turbulência, considerando as devidas leis de semelhança de modelos (neste caso semelhança de Froude).

Na escada de ranhura vertical, a seção de comunicação entre tanques consecutivos representa um ponto de passagem obrigatório, onde ocorrem as maiores velocidades. Considerando os tipos de velocidades características dos peixes, tem-se como limitante para a passagem pela ranhura, que a velocidade de explosão da espécie seja maior do que a velocidade encontrada na ranhura para que o mesmo tenha chances de realizar a transposição, mesmo com um esforço excessivo, que não é o desejado. O que seria mais razoável admitir seria a consideração da velocidade máxima na ranhura inferior igual à velocidade crítica das espécies. Ultrapassando o obstáculo das maiores velocidades dentro de cada tanque, os indivíduos encontram regiões de descanso onde, se necessário, podem se recuperar entre as passagens pelas ranhuras.

Vicentini *et al.* (2004) e Viana (2005) realizaram estudos em um modelo reduzido da escada para peixes da UHE de Igarapava, com espécies piscícolas, com o objetivo de definir rotas preferenciais durante a transposição dentro da estrutura, bem como relacionar com os valores das velocidades médias medidas em protótipo e no modelo pelo grupo do Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG. Como o estudo da presente tese envolve a mesma estrutura avaliada por Vicentini *et al.* (2004) e Viana (2005), procura-se associar o comportamento do caminho dos peixes observado por esses autores com as características da turbulência verificadas no presente trabalho.

Vicentini *et al.* (2004) e Viana (2005) realizaram estudos com peixes em um modelo na escala 1:10. Como não é possível o estudo de indivíduos adultos no estudo em modelo, pelas dimensões da estrutura, os autores procuraram escolher uma espécie de menores dimensões com características semelhantes a uma espécie adulta de valor econômico, que utiliza a escada de UHE de Igarapava. Devido à importância biológica e econômica do *Prochilodus sp* (curimatã), os autores optaram por trabalhar com uma espécie adulta de pequeno porte pertencente à mesma ordem, no caso dos *characiformes* e de hábitos natatórios próximos aos do curimatã. A escolha de Viana (2005) recaiu sobre o *Astyanax bimaculatus* (lambari de rabo amarelo). Da Figura 4.47 à Figura 4.50 são apresentados os comportamentos típicos encontrados nos estudos de laboratório, mostrando os caminhos preferenciais dos indivíduos. Os autores procuraram identificar como ocorre a “negociação”, ou seja, como é o posicionamento antes de passar pela ranhura e as regiões de descanso no tanque. Viana (2005) verificou que os indivíduos permanecem sempre junto ao fundo. Para subir pelo escoamento principal, o indivíduo se desloca para a região lateral do escoamento principal, tanto para a direita como para a esquerda do jato (Figura 4.47). Verifica-se o comportamento claro dos indivíduos, na busca de regiões mais favoráveis, fugindo das maiores velocidades, que coincidem com as zonas de maior energia cinética da turbulência (Figura 4.32, Figura 4.33 e

Figura 4.34) e de maiores tensões de Reynolds no plano xy (Figura 4.42, Figura 4.43 e Figura 4.44).

Na Figura 4.48 pode-se verificar que ao passar pela ranhura, o peixe procura percorrer a região da entrada do tanque rapidamente e, segundo Viana (2005), direcionar-se para os locais de menores velocidades. A Figura 4.48 mostra o peixe na passagem pela abertura mais próxima ao defletor maior, região onde foram observadas menores velocidades no plano xy, conforme pode ser observado na Figura 4.23.

Vicentini *et al.* (2004) e Viana (2005) verificaram que os indivíduos descansam nas regiões próximas às paredes laterais e adjacentes ao fluxo principal na zona da recirculação maior, conforme demonstrado na Figura 4.49 e na Figura 4.50, permanecendo direcionados no sentido oposto às linhas de fluxo bem definidas. Os autores não verificaram a permanência do indivíduo na região central do tanque maior. Viana (2005) considerou que a região central apresentaria maior turbulência sem apresentar linhas de fluxo definidas. Na avaliação realizada neste trabalho, verificou-se que na região central da recirculação maior ocorrem valores mais elevados de intensidade da turbulência, mas a distribuição da energia cinética da turbulência e das tensões de Reynolds não se altera entre as regiões centrais e periféricas da grande recirculação. Acredita-se que os peixes preferem descansar próximos às paredes e nas regiões adjacentes ao jato principal por apresentarem velocidades inferiores às encontradas no jato principal, mas com um direcionamento bem definido, sendo que as espécies estariam instintivamente sempre no sentido do contrafluxo.

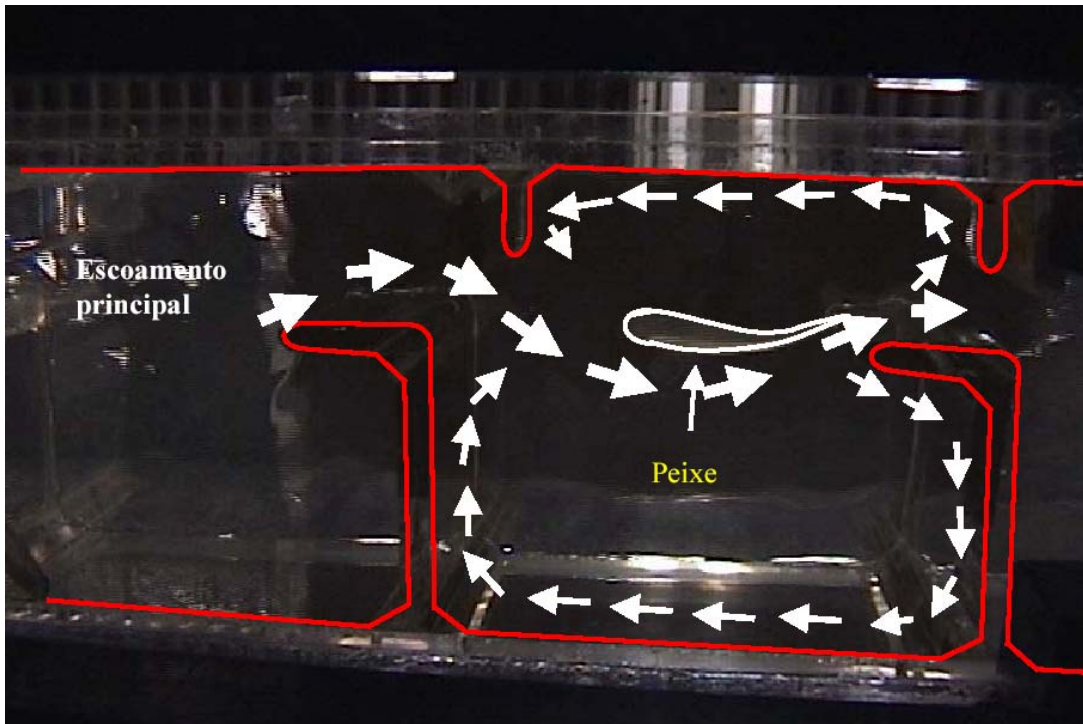


Figura 4.47 –*Astyanax bimaculatus* (lambari) entrando na região de maior velocidade do escoamento. Fonte: Vicentini *et al.* (2004) e Viana (2005). As setas indicam as principais correntes do escoamento.

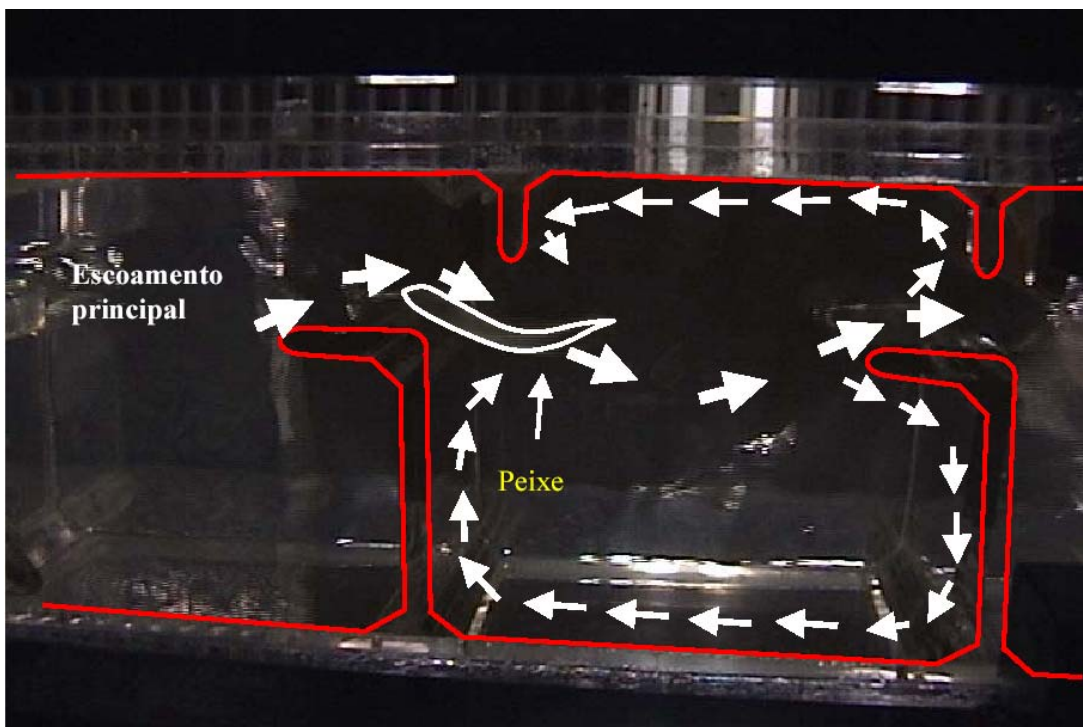


Figura 4.48 –*Astyanax bimaculatus* (lambari) executando a passagem pela ranhura vertical. Fonte: Vicentini *et al.* (2004) e Viana (2005). As setas indicam as principais correntes do escoamento.

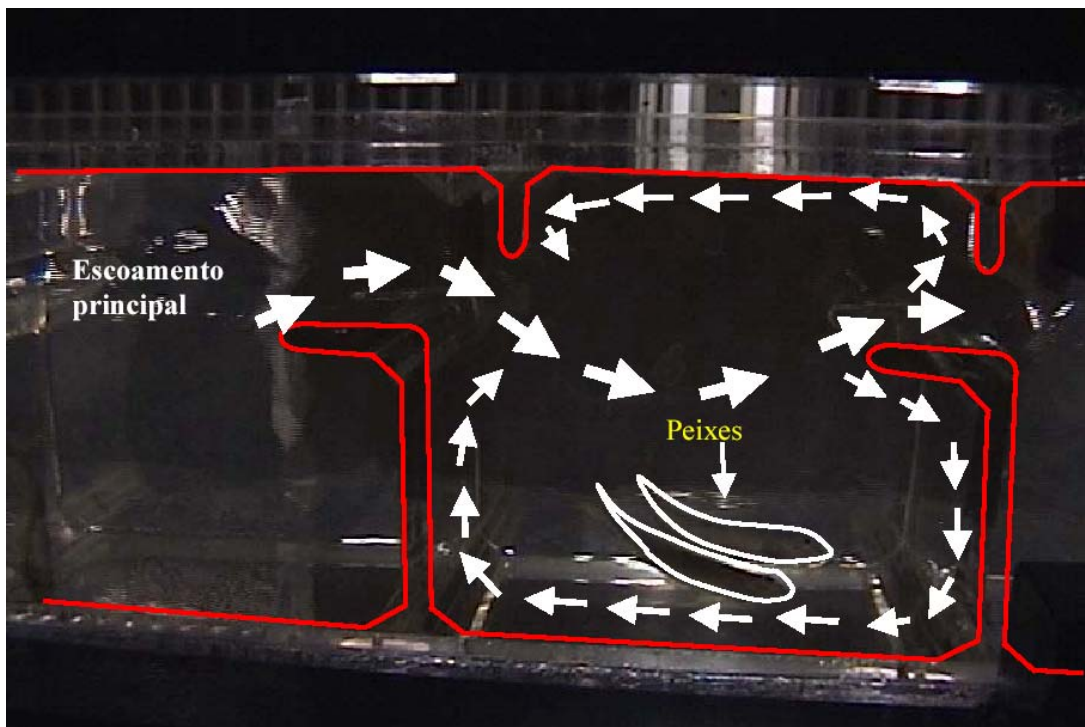


Figura 4.49 –*Astyanax bimaculatus* (lambari) próximo a parede, região preferencial para descanso. Fonte: Vicentini *et al.* (2004) e Viana (2005). As setas indicam as principais correntes do escoamento.

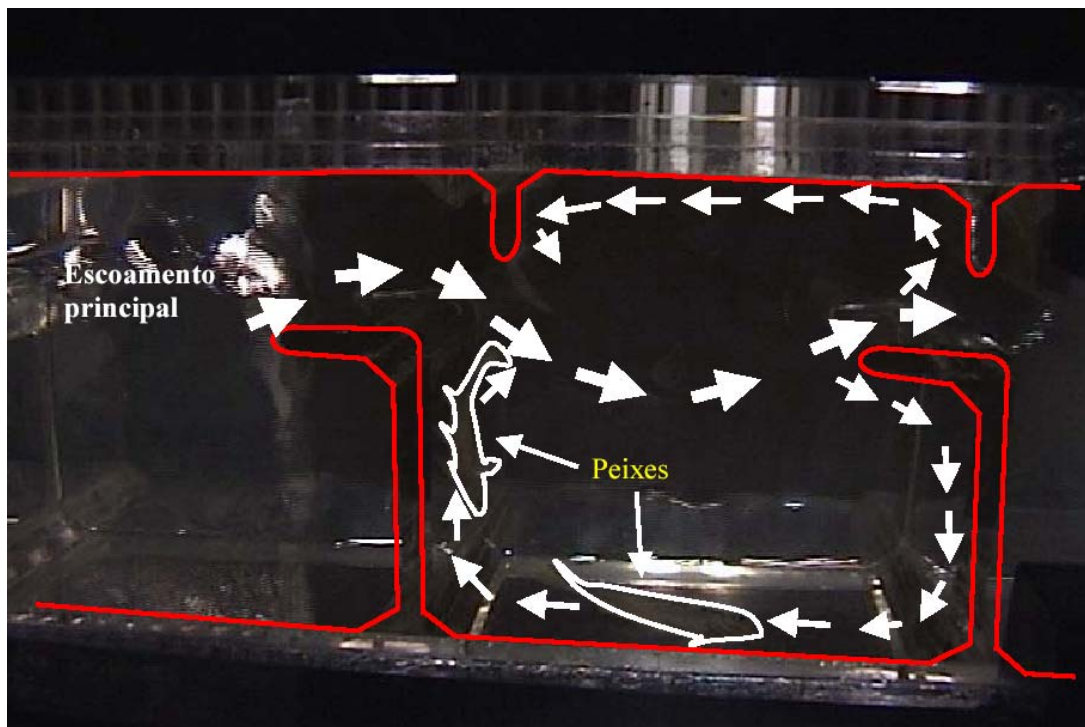


Figura 4.50 –*Astyanax bimaculatus* (lambari) próximo a parede, região preferencial para descanso. Fonte: Vicentini *et al.* (2004) e Viana (2005). As setas indicam as principais correntes do escoamento.

No presente trabalho foram realizadas algumas observações de peixes em um modelo da escada para peixes da UHE Igarapava, na escala 1:20. O objetivo desses testes é avaliar qualitativamente o caminho preferencial dos indivíduos ao longo dos tanques. O modelo utilizado nesses testes está descrito em Coletti (2005).

Nesse estudo, foram inseridos peixes adultos (*Astyanax bimaculatus*) de dimensões compatíveis com o modelo na escala 1:20 (ranhura de 2 cm e 27 tanques de 15 x 15 cm), sendo registrada a trajetória do mesmo através de câmara digital. A seguir apresentam-se alguns quadros do registro em vídeo dessa trajetória.

No início do caminho para montante, observa-se que o mesmo fica por vários segundos a jusante da primeira ranhura, em uma posição adjacente ao jato principal. Observa-se na Figura 4.51, que durante esse período, o mesmo posiciona o seu corpo de diferentes maneiras, provavelmente procurando as posições mais favoráveis para passar pelo obstáculo formado pelo escoamento proveniente do jato. A passagem ocorre no lado do septo maior, concordando com os valores observados de menores velocidades e menores valores de energia cinética da turbulência e tensões de Reynolds, conforme pode ser observado na Figura 4.36 e na Figura 4.46, respectivamente.

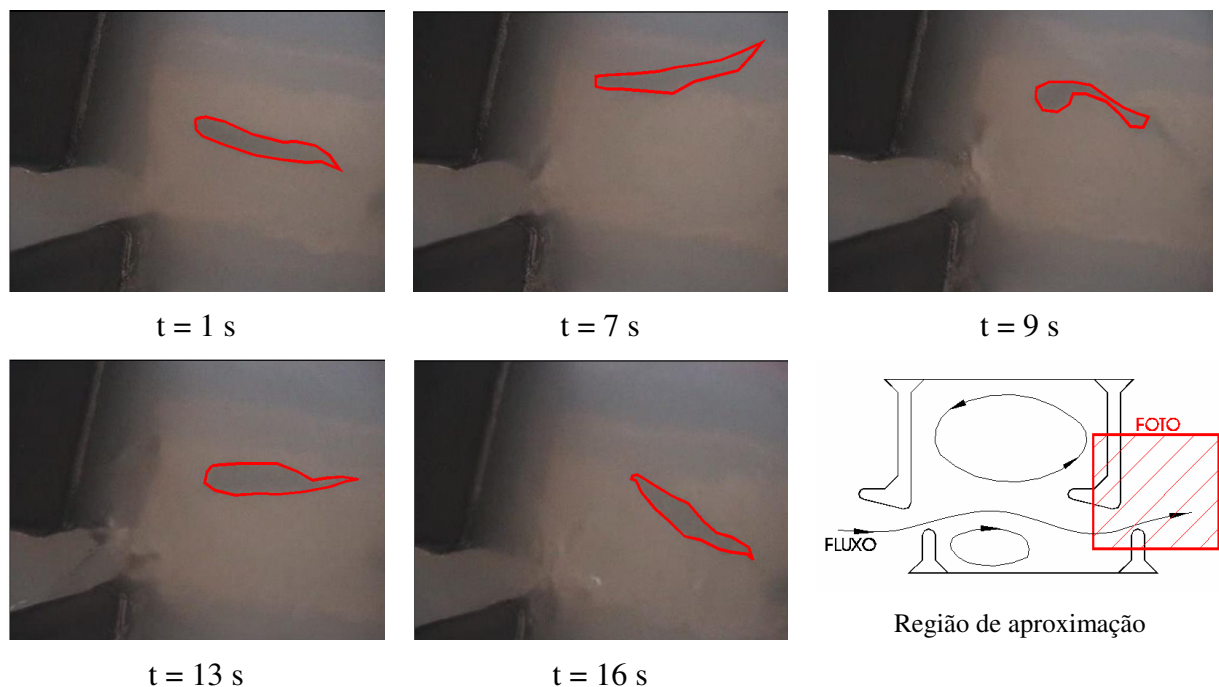


Figura 4.51 – Posicionamento do peixe a jusante da primeira ranhura no caminho de jusante-montante, no modelo na escala 1:20. Fonte: Própria.

Na seqüência registrada o percurso pelo segundo tanque foi executado em menos tempo, seguindo os mesmos padrões da aproximação feita para a passagem pela primeira ranhura, como pode ser observado na Figura 4.52, procurando a passagem pela ranhura junto ao septo maior, adjacente ao jato principal e a recirculação maior.

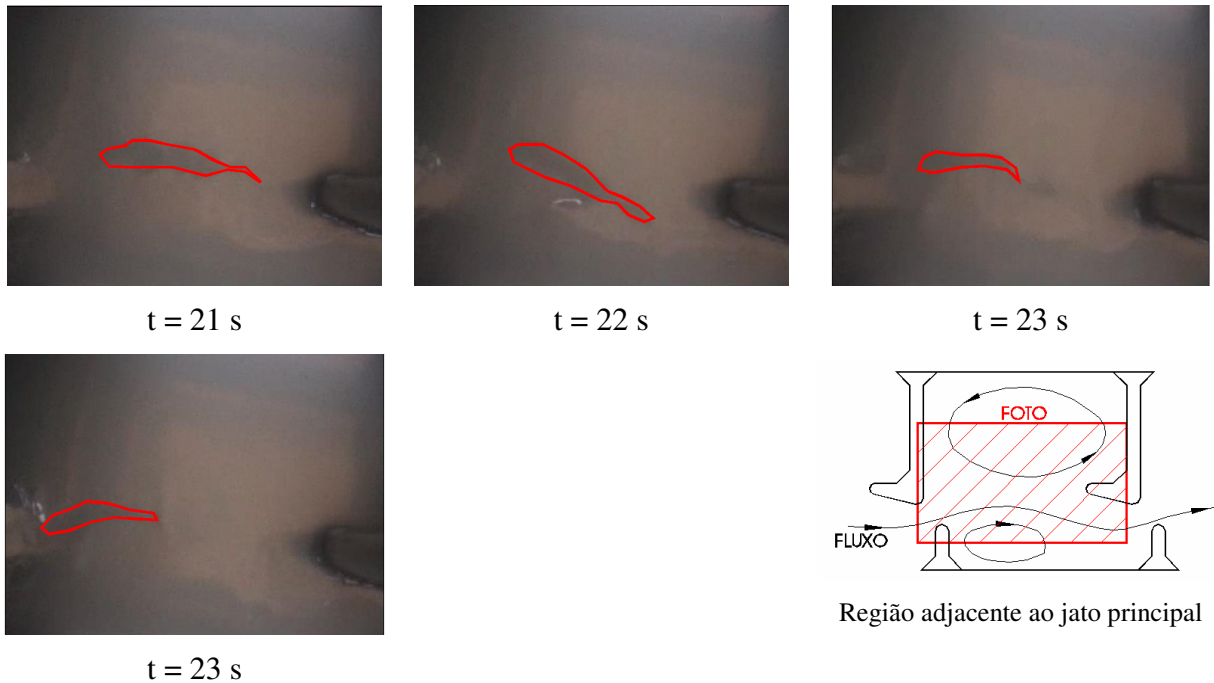


Figura 4.52 – Passagem do peixe pelo primeiro tanque no modelo na escala 1:20, entre a 1ª e a 2ª ranhura. Tempo em segundos. Fonte: Própria.

No percurso entre a segunda e terceira aberturas, verifica-se que o peixe procura a aproximação junto ao septo menor, de maneira diferente à observada até o momento, no entanto, possivelmente ao verificar condições desfavoráveis, desloca-se para realizar a passagem pela ranhura junto ao septo maior.

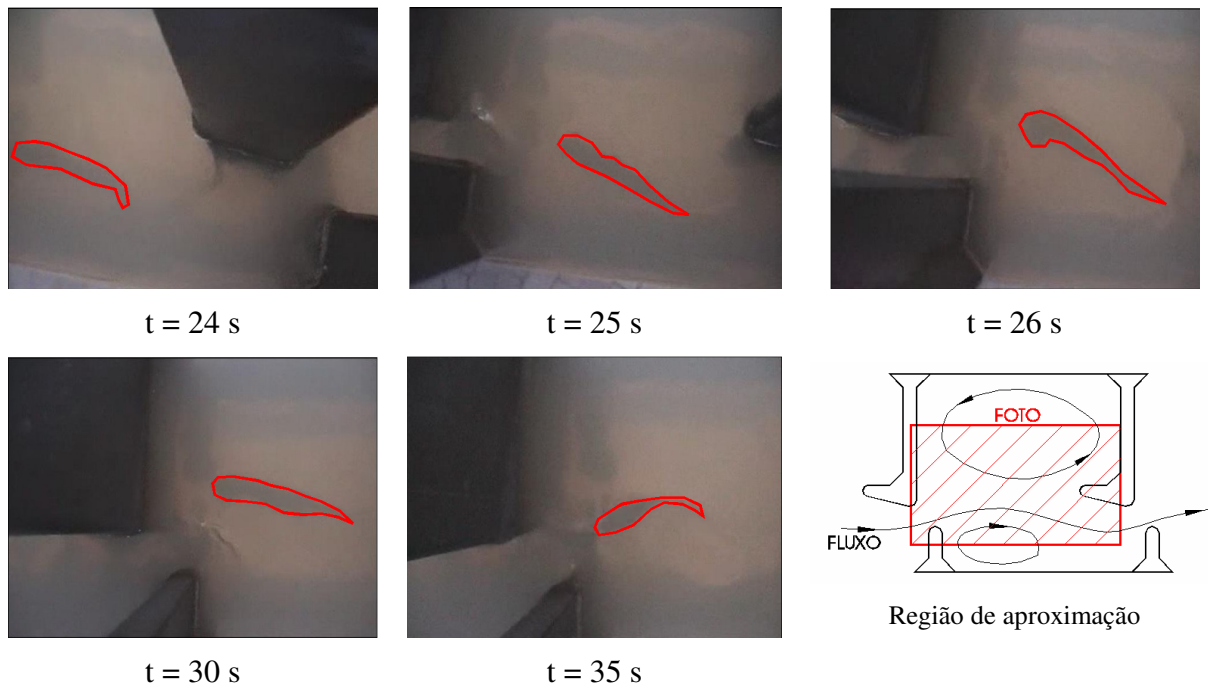





Figura 4.53 – Passagem do peixe pelo primeiro tanque no modelo na escala 1:20, entre a 2ª e a 3ª ranhura. Tempo em segundos. Fonte: Própria.

De uma maneira geral, observa-se um comportamento padrão durante o deslocamento do peixe para montante. O mesmo fica posicionado entre o jato principal e a recirculação maior, escolhendo passar pela ranhura junto ao defletor maior, confirmando os resultados obtidos na caracterização hidráulica, que mostram que estas regiões são menos agressivas quanto aos diferentes parâmetros avaliados. Observou-se, também, através da análise de vários indivíduos que, geralmente, a “negociação” para a passagem pela primeira abertura leva mais tempo e então, nas demais passagens, o tempo é reduzido.

4.2.6 Definição de Barreiras Hidráulicas

Santos (2007) avaliou a velocidade crítica de três espécies de peixes, obtendo os resultados apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Velocidade crítica de algumas espécies de peixes presentes na ictiofauna brasileira.

| Espécie de peixe | Mandi | Piau | Curimba |
|---|---|--|---|
| Nome científico | <i>Pimelodus maculatus</i> | <i>Leporinus reinhardti</i> | <i>Prochilodus costatus</i> |
| Imagem representativa da espécie |  |  |  |
| Comprimento de referência (cm)** | 23 | 16 | 29 |
| Velocidade crítica do comprimento de referência (m/s) | 1,47* | 1,32* | 1,23* |

* Fonte: Santos (2007)

** Santos (2007) procurou utilizar indivíduos com o comprimento total correspondente ao comprimento padrão do mesmo na época da primeira maturação. No caso do mandí, o comprimento corresponde a primeira maturação é de 19 cm, mas pela dificuldade na captura de exemplares com esta característica, utilizou-se mandis com comprimento de referência de 23 cm.

A partir desses valores e considerando que essas espécies de peixes são observadas na passagem pela escada para peixes da UHE de Igarapava, optou-se em confrontar os valores de velocidade crítica avaliados por Santos (2007), com os campos de velocidades médias medidas em modelo, realizando as devidas transposições de escala (1:5).

A Figura 4.54, a Figura 4.55 e a Figura 4.56 apresentam, para as três descargas avaliadas, as regiões cuja velocidade excede a velocidade crítica desses peixes. Nessas figuras delimitam-se as regiões em verde, que representam zonas com velocidades superiores à velocidade crítica do curimba (>1,23 m/s); em amarelo, as velocidades superiores à velocidade crítica do curimba e do piau (>1,32 m/s) e em vermelho, maiores que à velocidade crítica das três espécies (> 1,47 m/s). Essa representação dos dados reforça a leitura e interpretação dos resultados apresentados. Verifica-se que na região da ranhura e a jusante desta, no caminho do jato principal, encontram-se valores de velocidade superiores à velocidade crítica dessas três espécies. A barreira imposta em parte do caminho do jato principal foi observada durante o estudo da trajetória dos indivíduos, apresentado no item anterior. Observou-se, claramente, que os indivíduos preferem a aproximação da ranhura pela

região do tanque adjacente à recirculação maior, assim desviando das regiões com maiores velocidades, que formam uma barreira hidráulica.

A Figura 4.57 apresenta o detalhamento deste tipo de análise para um plano vertical passando pela ranhura. Verifica-se que em praticamente toda a seção da ranhura, as velocidades são superiores às velocidades críticas das espécies avaliadas. Esse fato indica que, os peixes destas espécies utilizam velocidades superiores à velocidade crítica para passar de um tanque a outro.

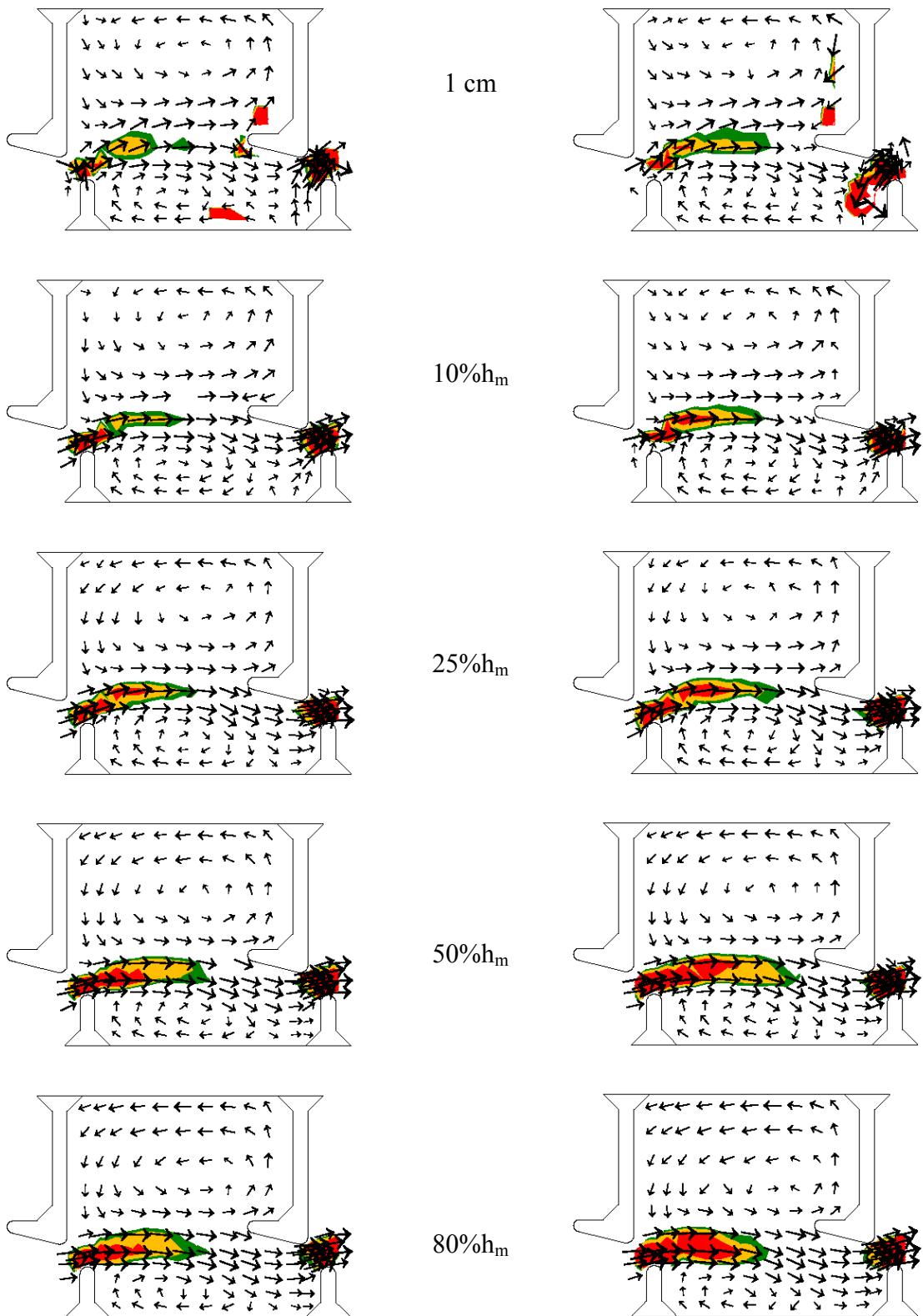


Figura 4.54 – Delimitação das regiões com velocidades superiores à velocidade crítica das espécies mandi (1,47 m/s), piauí (1,32 m/s) e curimba (1,23 m/s) para $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

Figura 4.55 – Delimitação das regiões com velocidades superiores à velocidade crítica das espécies mandi (1,47 m/s), piauí (1,32 m/s) e curimba (1,23 m/s) para $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

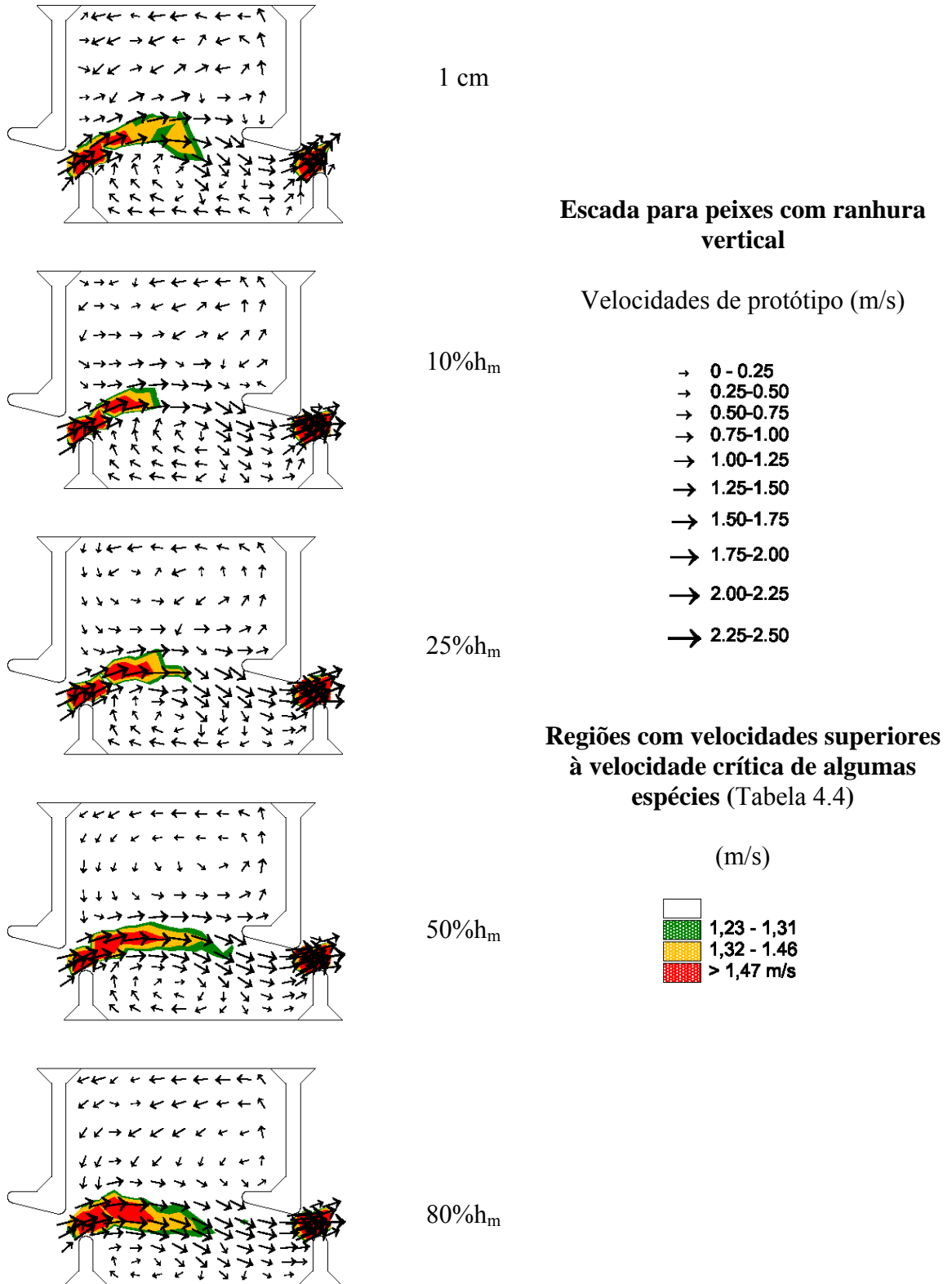


Figura 4.56 – Delimitação das regiões com velocidades superiores à velocidade crítica das espécies mandi (1,47 m/s), piau (1,32 m/s) e curimba (1,23 m/s) para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

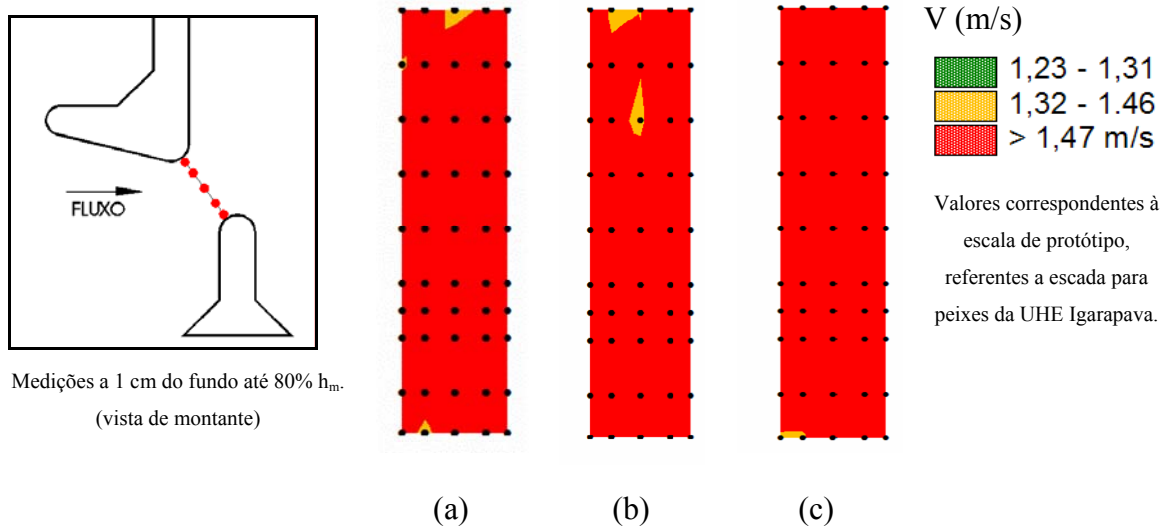


Figura 4.57 – Classificação da velocidade na ranhura na escala de protótipo, de acordo com a velocidade crítica das espécies mandi (1,47 m/s), piau (1,32 m/s) e curimba (1,23 m/s) para:

(a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.3 Estrutura B1 – MTP com Descarregador de Superfície

Neste estudo optou-se pela caracterização das velocidades e da turbulência em três descargas caracterizadas pelo escoamento com jato semi-afogado. Essa escolha baseou-se em resultados do projeto inserido no programa AGRO (INIAP 114)⁴, onde se verificou a preferência dos peixes por situações de jato semi-afogado à escoamentos com jato livre.

Para a avaliação do coeficiente de descarga foram realizadas medições da profundidade do escoamento para vazões adicionais, incluindo condições do escoamento que passam pelo descarregador, com jato livre e jato semi-afogado.

4.3.1 Coeficiente de Descarga

A avaliação do coeficiente de descarga (C_d) na passagem para peixes por descarregador de superfície foi realizada ao longo de todos os defletores do canal através da equação (2.7), para o caso de jato livre e, através das equações (2.8) e (2.9), para o jato semi-afogado.

$$Q = C_d \cdot b \sqrt{2 \cdot g} \cdot H_1^{3/2} \quad (\text{jato livre}) \quad (2.7)$$

$$Q_n = K \cdot Q_d \quad (\text{jato semi-afogado}) \quad (2.8)$$

$$K = \left[1 - \left(\frac{(H_1 - \Delta h)}{H_1} \right)^2 \right]^{0,385} \quad (\text{coeficiente de redução de vazão}) \quad (2.9)$$

Sendo: b a largura do descarregador; H_1 é a diferença do nível de água a montante do descarregador e a cota da crista; Q_n a vazão que passa por um descarregador semi-afogado; Q_d a vazão em situação de escoamento livre (não-afogado); K é um coeficiente que indica a redução de vazão devido a submergência (afogamento) do jato; Δh é a diferença entre os níveis de água a montante e a jusante do vertedor; conforme definido na Figura 2.9.

Foram realizadas medições da linha de água junto às paredes laterais transparentes, dos dois lados. Do lado do descarregador, foi avaliado o comportamento da linha de água na aproximação, na passagem pelo defletor e na entrada do jato no tanque de jusante. No lado oposto, mediu-se apenas o desnível do escoamento entre os tanques.

⁴ Projeto “Desenvolvimento e aplicação de uma passagem para peixes destinada a obras transversais fluviais de utilização agrícola” desenvolvido entre 1 de Junho de 2002 e 1 de Junho de 2005, pelo Instituto Superior de Agronomia, Instituto Superior Técnico, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Direcção Geral dos Recursos Florestais. (Consulta ao Relatório Final do Projeto, Julho de 2005 e comunicação pessoal com integrantes do projeto).

A Figura 4.58 apresenta o comportamento da linha d'água junto à parede lateral do descarregador. Foram testadas as duas situações de escoamento passando pelo descarregador: jato livre e jato semi-afogado. As duas vazões menores caracterizam o jato livre, como pode ser observado na Figura 4.58, onde a linha d'água após o descarregador encontra-se abaixo da soleira vertedoura ($H=0$ cm). Para as demais vazões, tem-se o jato semi-afogado, sendo que o aumento da descarga resulta em percentuais maiores de afogamento.

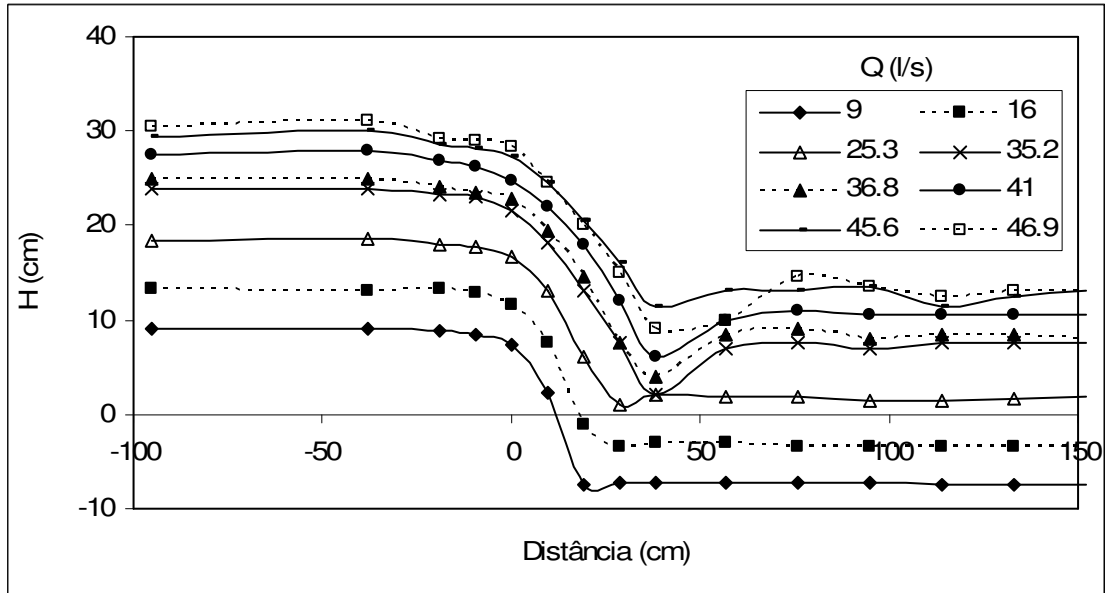


Figura 4.58 – Perfil do escoamento na região do descarregador para diferentes vazões (O descarregador está na distância = 0).

A Figura 4.59 mostra o comportamento do coeficiente de descarga para as diferentes vazões. Apenas para as duas menores vazões têm-se condições de jato livre, conforme pode ser observado na Figura 4.58. Para essas vazões esperavam-se valores um pouco superiores para o coeficiente de descarga, em relação às situações de jato semi-afogado. Observa-se que há uma tendência do coeficiente de descarga reduzir com o aumento da vazão, devido ao maior afogamento do jato. Os valores do coeficiente de descarga encontram-se entre 0,34 e 0,39, com um valor médio, nesta estrutura, em torno de 0,365.

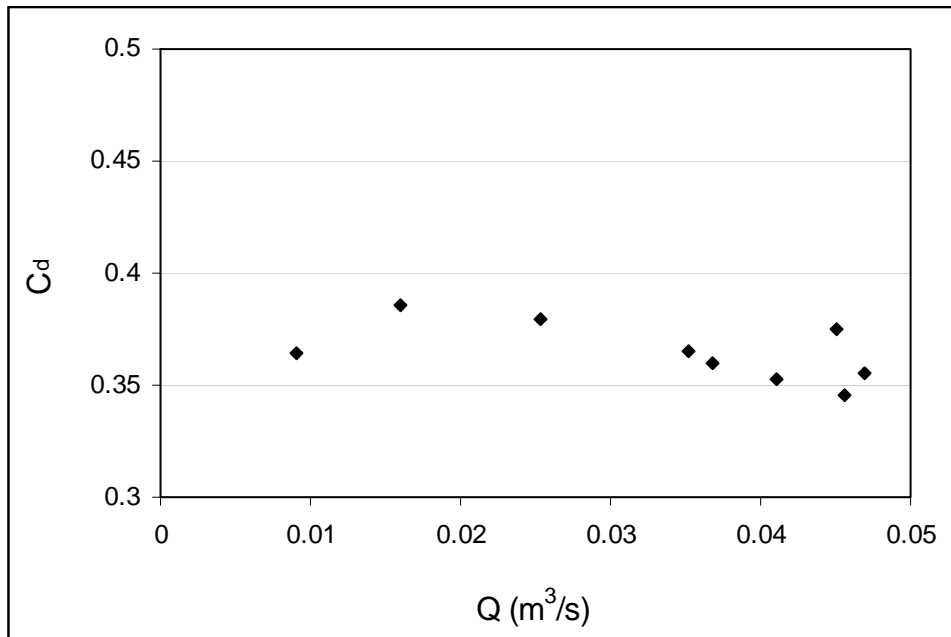


Figura 4.59 – Coeficiente de descarga do descarregador de superfície para diferentes vazões.

4.3.2 Velocidades e Turbulência

Da mesma maneira que foi apresentado na avaliação dos campos de velocidades médias e parâmetros da turbulência escada para peixes de ranhura vertical, procura-se, a seguir, comentar sobre os padrões observados no modelo da passagem por descarregadores de superfície, com o objetivo de caracterizar o fluxo neste tipo de estrutura.

4.3.2.1 Campos de velocidades médias

Os campos de velocidades médias, para diferentes planos paralelos ao fundo, indicam não ocorrerem grandes variações do comportamento geral com a mudança da vazão. Esse é um comportamento esperado, já que a diferença das profundidades médias do escoamento é pequena, e em todas as situações o jato está semi-afogado.

Observando-se os campos de velocidades em planos paralelos ao fundo, tem-se que as maiores velocidades ocorrem no plano mais superficial, em um caminho que liga o descarregador de montante ao descarregador de jusante. No caminho do jato que passa pelo descarregador têm-se velocidades elevadas, que tendem a diminuir seu valor à medida que se afastam do defletor de montante. Ao se aproximar do defletor de jusante, o escoamento muda de direção, sendo que parte segue em direção ao descarregador de jusante, e parte recircula no tanque. Em todos os planos paralelos ao fundo observa-se uma grande recirculação no tanque.

O centro dessa recirculação parece se deslocar para jusante à medida que se aproxima da superfície.

Na passagem pelo descarregador foram realizadas medições mais detalhadas, com o objetivo de verificar as máximas velocidades nesta região, que é uma zona de passagem obrigatória no caminho de transposição dos peixes. Da mesma maneira que verificado no tanque, tem-se que a variação da vazão não altera o padrão geral dos campos de velocidades. As máximas velocidades médias medidas no modelo, na região do descarregador, são 1,64, 1,61 e 1,73 m/s, para as vazões de 0,0368; 0,0410 e 0,0456 m³/s, respectivamente. As velocidades máximas encontradas são um pouco inferiores ao valor estimado através da velocidade potencial ($V_p = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} = 1.80 \text{ m/s}$), que representa uma simplificação do valor máximo teórico.

Os campos de velocidades médias no plano horizontal foram adimensionalizados utilizando a velocidade potencial, do mesmo modo que foi realizado na avaliação da escada com ranhuras verticais. Os mapas do comportamento de velocidade adimensionalizada apresentam-se no Anexo 4.

Observa-se que a escada para peixes com descarregador de superfície apresenta na maior parte do tanque valores de velocidades bastante inferiores à velocidade potencial. Para os planos distantes 1 cm, 10% h_m , 25% h_m e 50% h_m do fundo, verifica-se que as componentes de velocidade não ultrapassam 40% da velocidade potencial (V_p). No plano mais próximo da superfície (80% h_m), na região da entrada do jato no tanque, observam-se velocidades de até 70% V_p , inferiores aos máximos valores medidos sobre o descarregador. O comportamento da relação V/V_p no tanque mostra que, provavelmente, as espécies com menor capacidade natatória, que necessitam utilizar a velocidade de explosão para nadar através do fluxo sobre o descarregador, encontram neste tipo de estrutura grandes regiões de descanso.

Junto aos campos das velocidades médias horizontais apresentam-se, em escalas de cores, os mapas das componentes verticais. Nos campos de velocidades mais próximos do fundo observa-se que as componentes verticais são, praticamente, desprezíveis, com valores entre -5 e 5 cm/s na maioria das regiões. Os demais planos paralelos ao fundo têm componentes verticais negativas (correntes descensionais) junto à parede de entrada do jato (que passa pelo descarregador), com valores que chegam a -30 cm/s, sendo mais pronunciadas no plano situado a 50% h_m . Observam-se valores de velocidades ascensionais, com magnitudes superiores a 20 cm/s na região oposta ao caminho do jato mergulhante, onde ocorre a recirculação de água dentro do tanque. Tem-se novamente no plano paralelo ao fundo, situado a 50% h_m , as maiores velocidades verticais ascensionais.

Para a melhor compreensão do comportamento das componentes verticais, apresentam-se os campos de velocidades em planos verticais, a fim de verificar a ocorrência de correntes características importantes.

Uma análise inicial nos campos de velocidades nos planos verticais indica um comportamento semelhante para as três vazões ensaiadas. Observa-se através da Figura 4.63, Figura 4.64 e Figura 4.65, que as componentes nos planos transversais não ultrapassam velocidades de 40 cm/s. No plano mais próximo do defletor de montante ($Y=0,16 x/L$, Figura 4.63) têm-se correntes correspondentes à grande recirculação que ocorre no tanque e correntes descensionais, provavelmente influenciadas pelo jato mergulhante que passa pelo descarregador. Em um plano transversal próximo do centro do tanque ($Y=0,58 x/L$, Figura 4.64) há uma leve recirculação no sentido horário. No plano transversal próximo ao defletor de jusante (Figura 4.65), verifica-se que as correntes observadas no plano paralelo ao fundo, mais próximas da superfície, com maiores velocidades, proveniente da água que passa pelo descarregador, mudam de direção, parte indo na direção do descarregador de jusante, e parte em direção ao fundo do tanque.

Nos planos verticais longitudinais confirma-se o observado nos planos paralelos ao fundo. No plano que passa pelo descarregador de entrada ($Y=0,10 y/B$, Figura 4.66), as maiores velocidades encontram-se mais próximas da superfície e diminuem com a profundidade. Logo após a passagem pelo descarregador, observam-se algumas velocidades inferiores as demais do mesmo plano. Como comentado anteriormente, acredita-se que esses valores refletem as limitações da avaliação da velocidade com o ADV em escoamentos com ar incorporado. Quando o fluxo superficial, de maior velocidade, atinge o defletor de jusante, confirma-se que parte do escoamento encaminha-se em direção ao fundo do tanque. No plano $Y=0,25 y/B$ (Figura 4.67), tem-se o fluxo no sentido montante-jusante com velocidades inferiores às observadas no plano que passa pelo descarregador.

No plano longitudinal que passa no centro do tanque, têm-se velocidades com valores inferiores a 50 cm/s. Observa-se que há uma tendência da formação de duas zonas de recirculação nesse plano. O fluxo descensional junto ao defletor de jusante chega até o fundo, segue no sentido contrário ao escoamento e então toma um caminho ascensional, formando uma recirculação de sentido horário. Outra recirculação, menos pronunciada, ocorre adjacente à zona turbilhonar descrita, com sentido oposto.

Nos planos $Y=0,75 y/B$ e $Y=0,90 y/B$, a maior parte dos vetores de velocidade apresentam sentido contrário ao escoamento principal de montante para jusante, com exceção de alguns pontos situados próximos à zona de aproximação do descarregador de saída do tanque. No plano $Y=0,75 y/B$ observa-se que há correntes descensionais próximas ao defletor.

O escoamento da região do contrafluxo da recirculação maior apresenta, além das componentes horizontais, correntes ascensionais, que diminuem ao se aproximarem do defletor de montante.

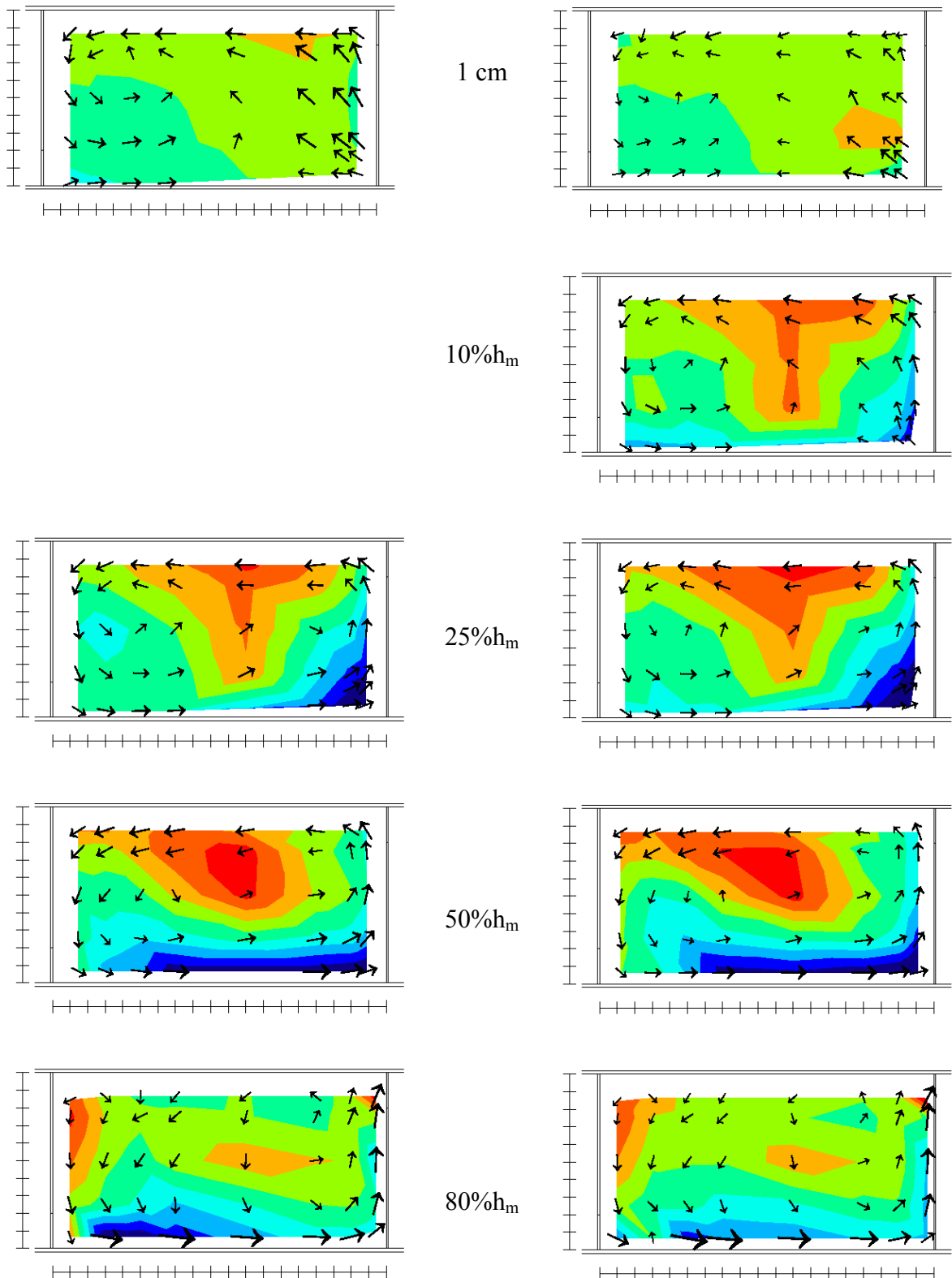


Figura 4.60 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.61 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Escada para peixes com descarregador de superfície

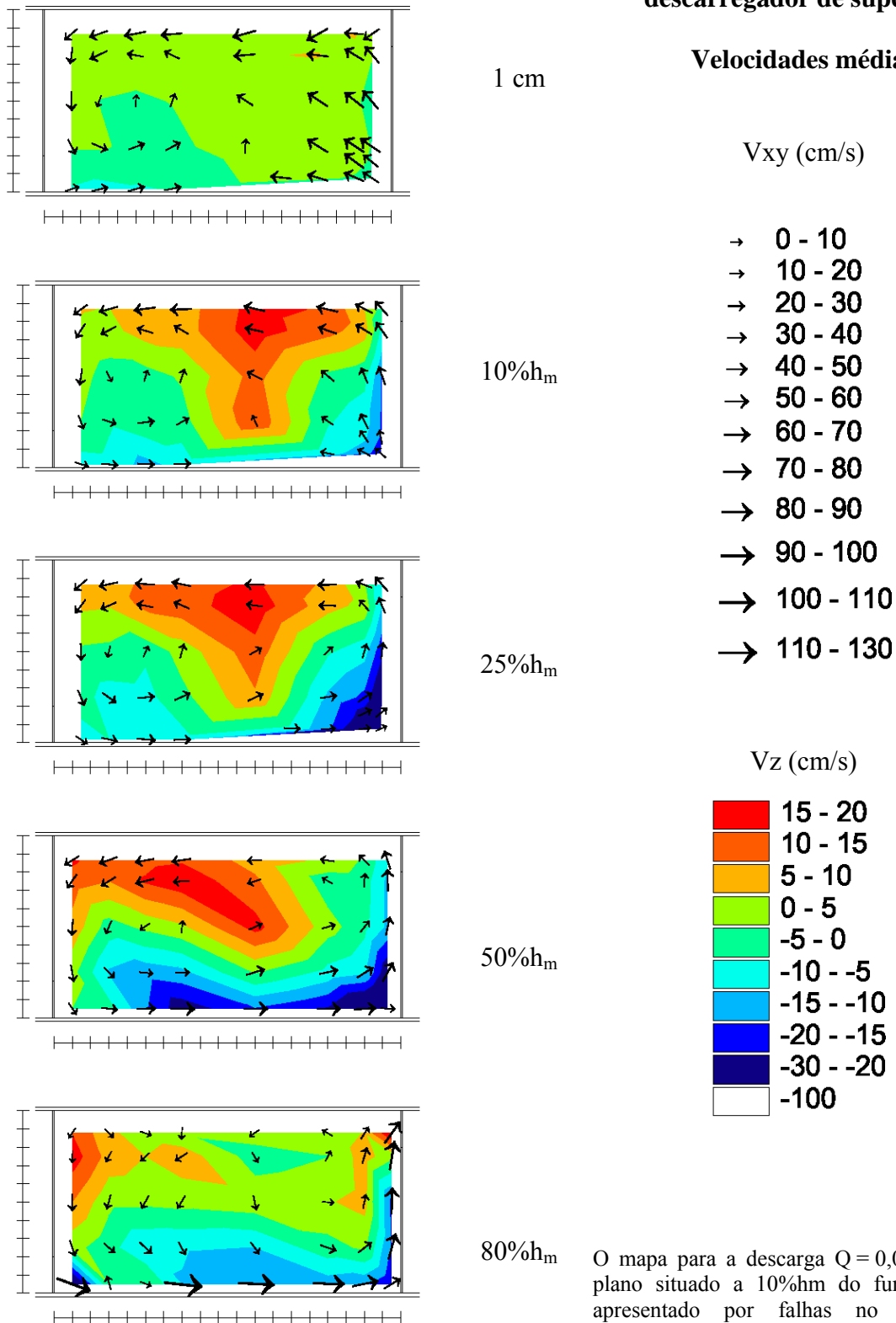


Figura 4.62 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

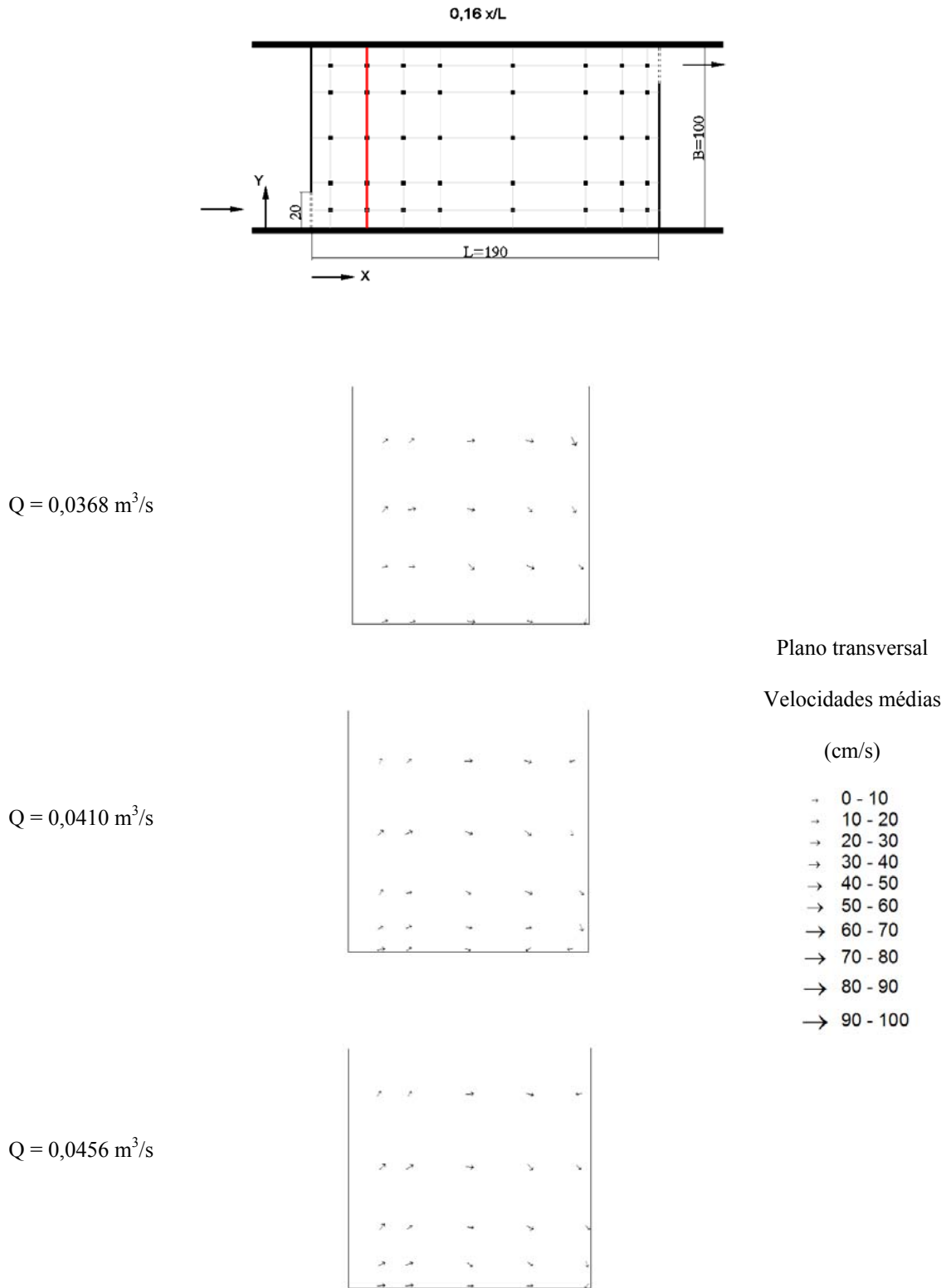


Figura 4.63 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,16 x/L$).

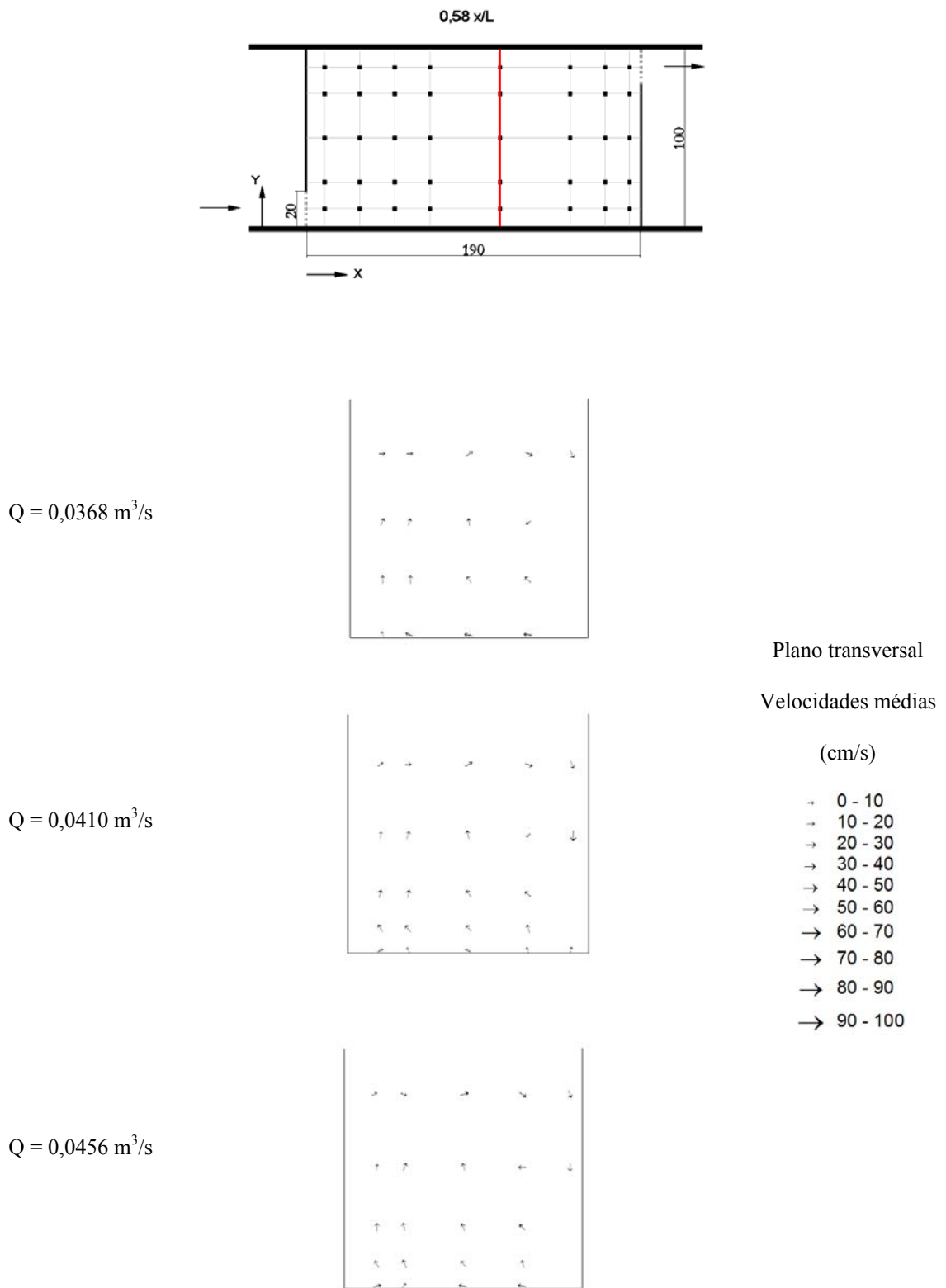


Figura 4.64 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,58 \times L$).

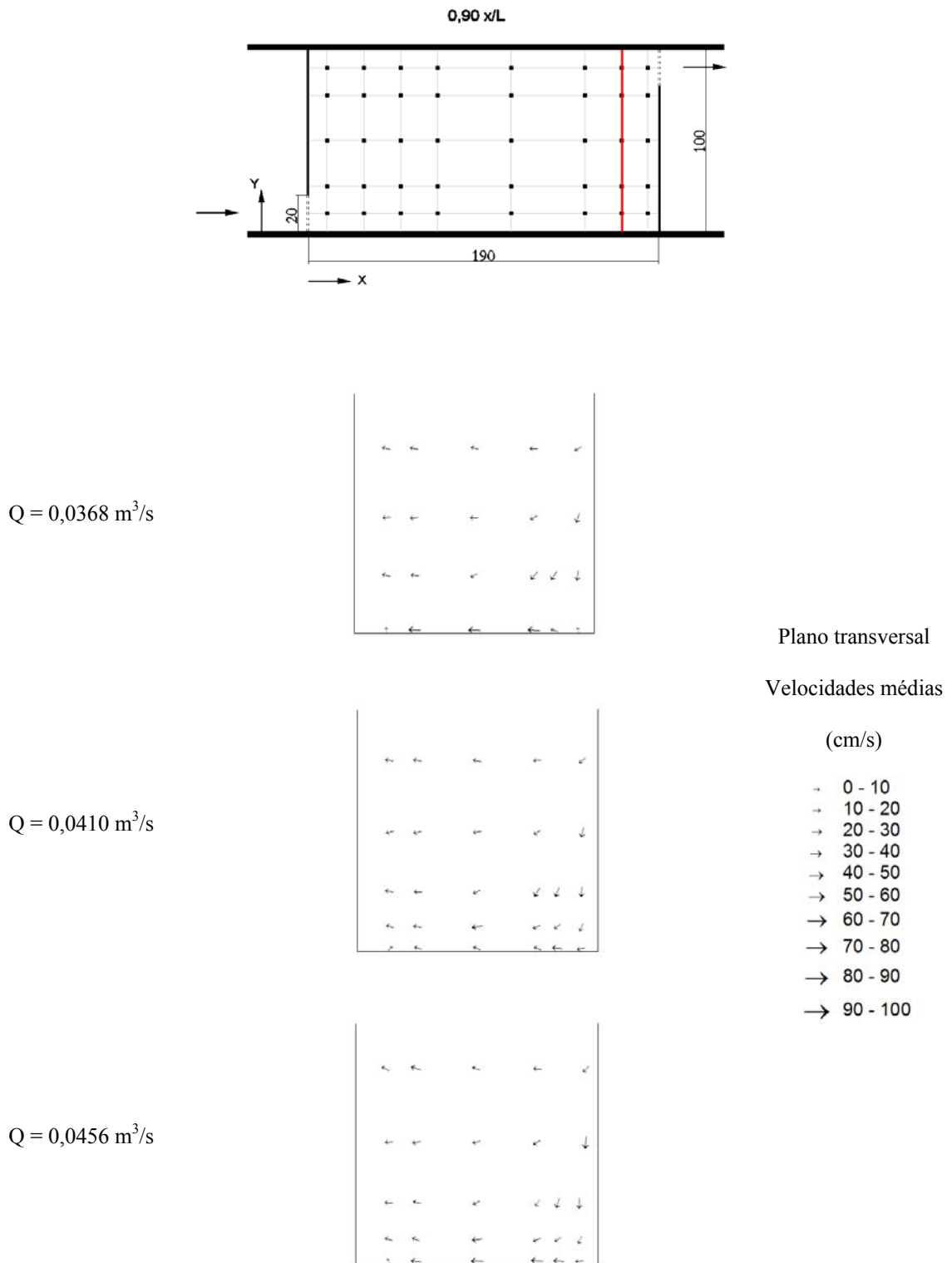


Figura 4.65 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,90 x/L$) para as vazões: (a) $0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$.

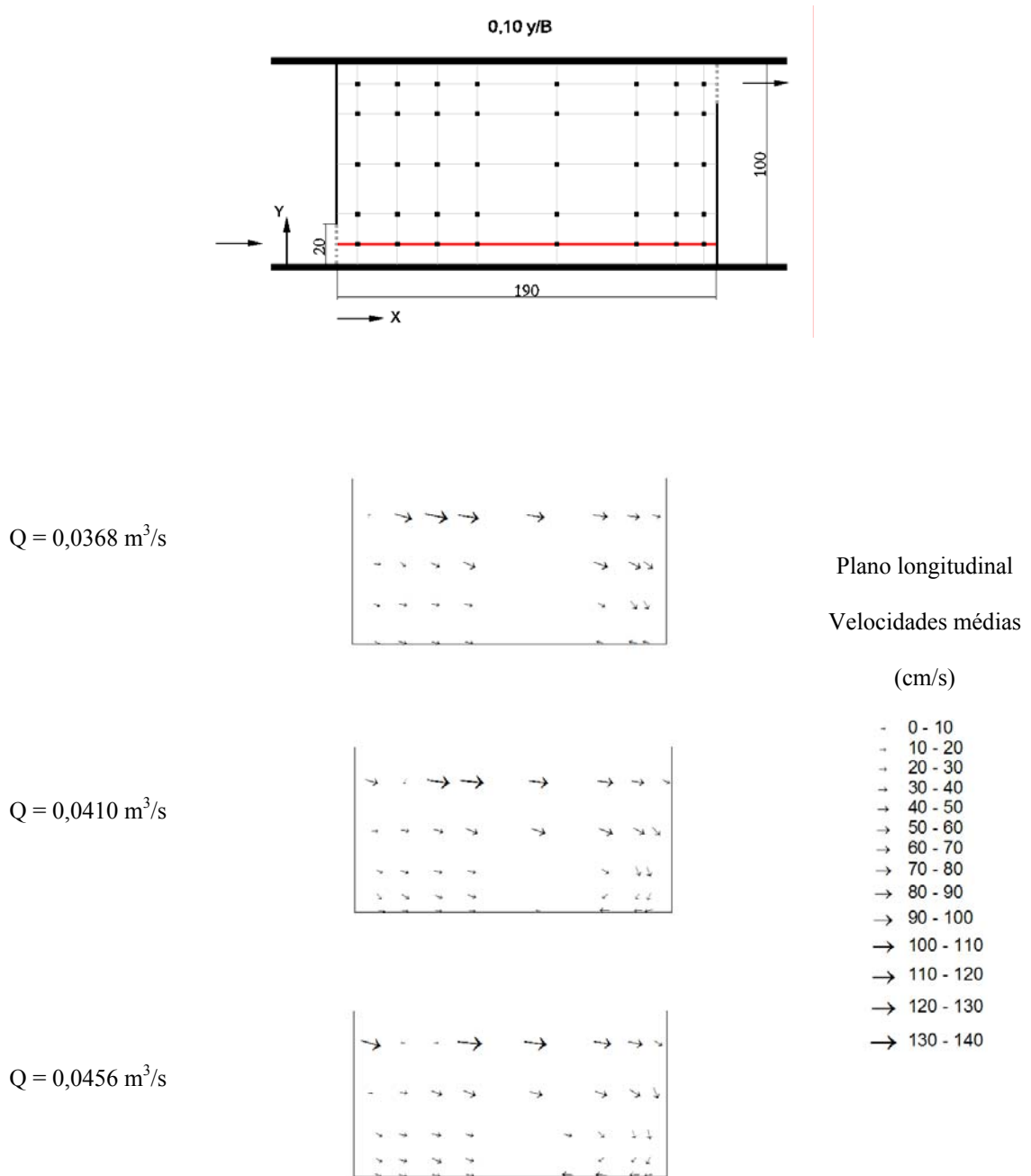


Figura 4.66 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,10 y/B$).

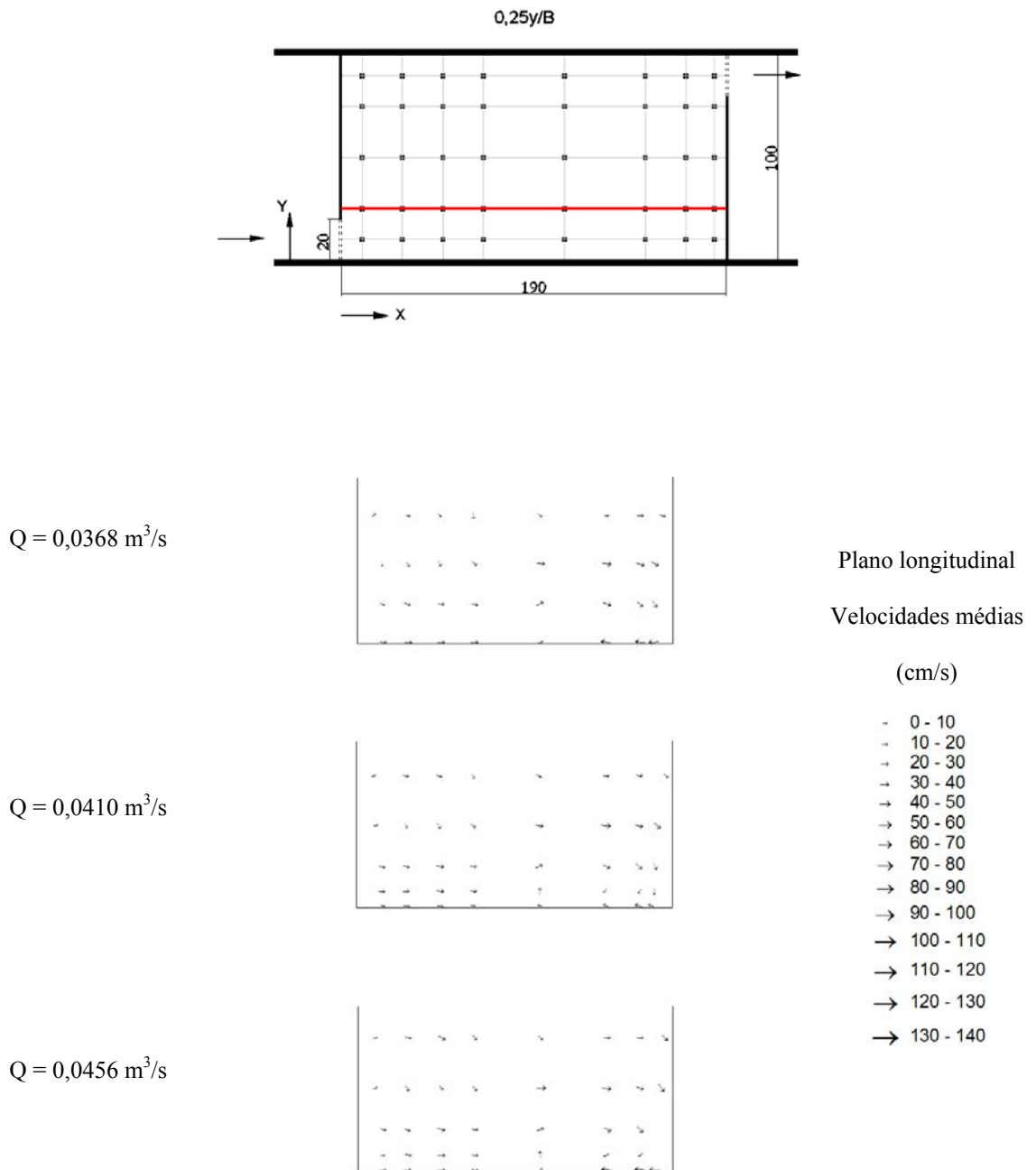


Figura 4.67 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,25 y/B$).

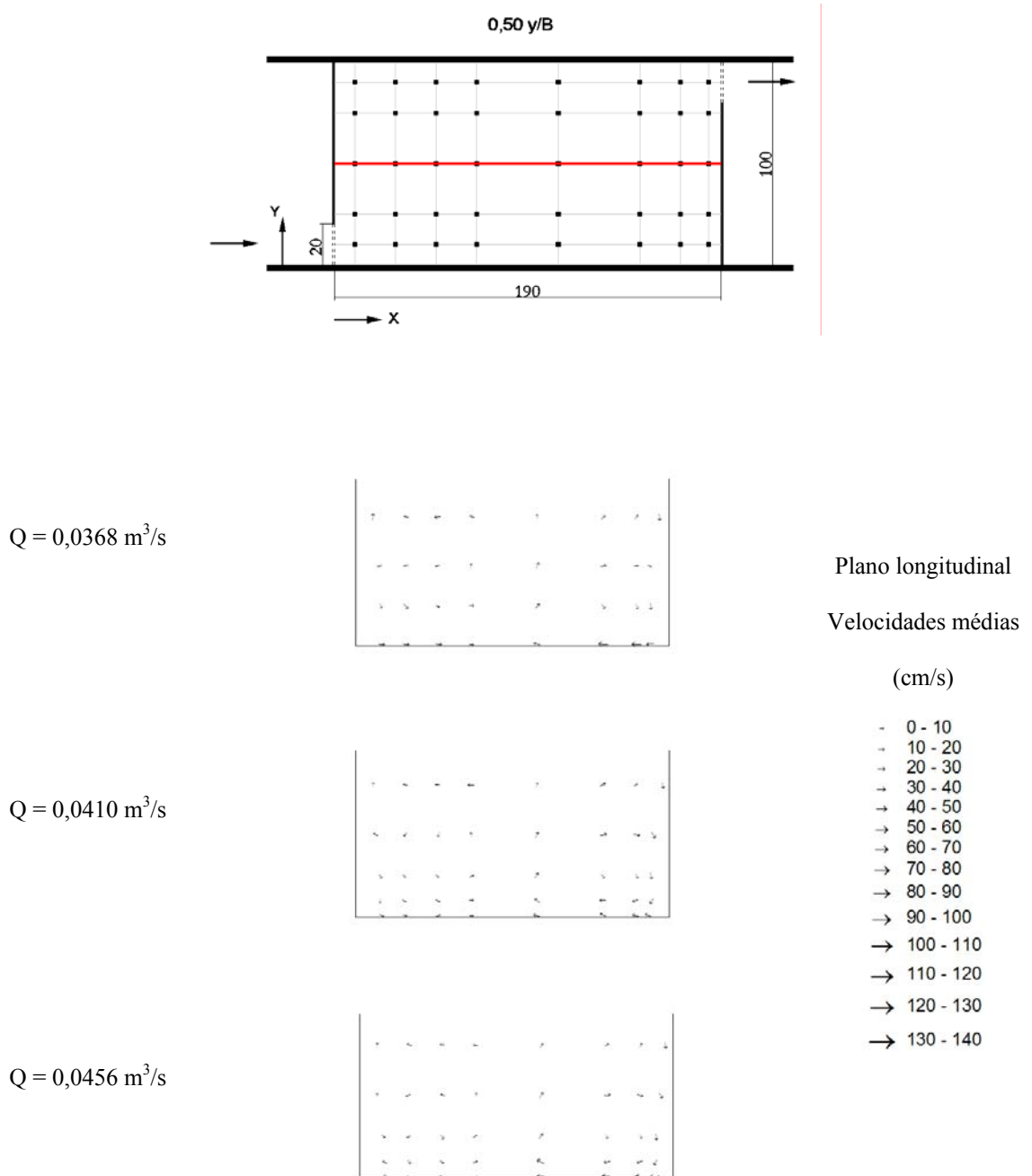


Figura 4.68 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,50 y/B$).

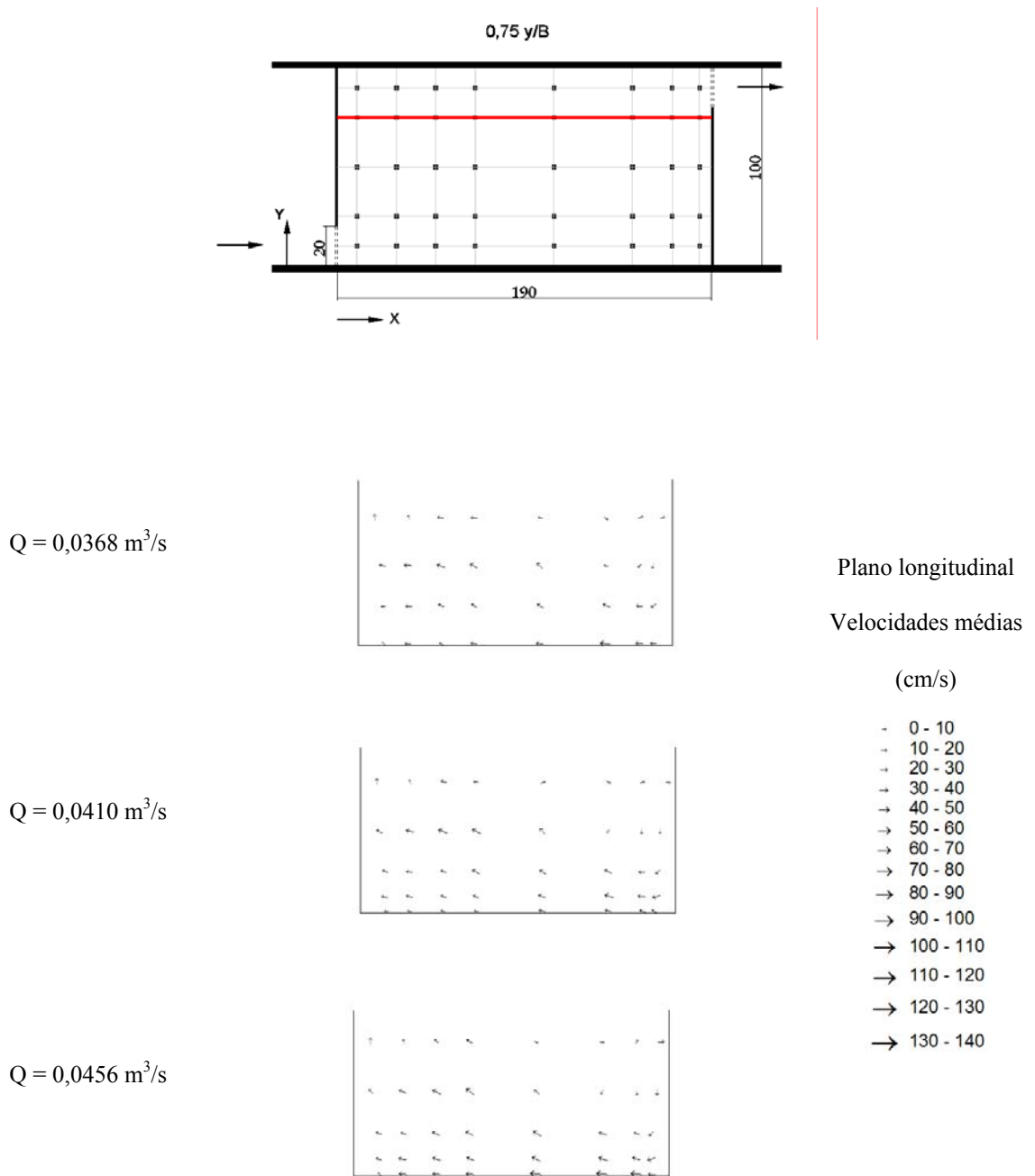


Figura 4.69 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,75 y/B$).

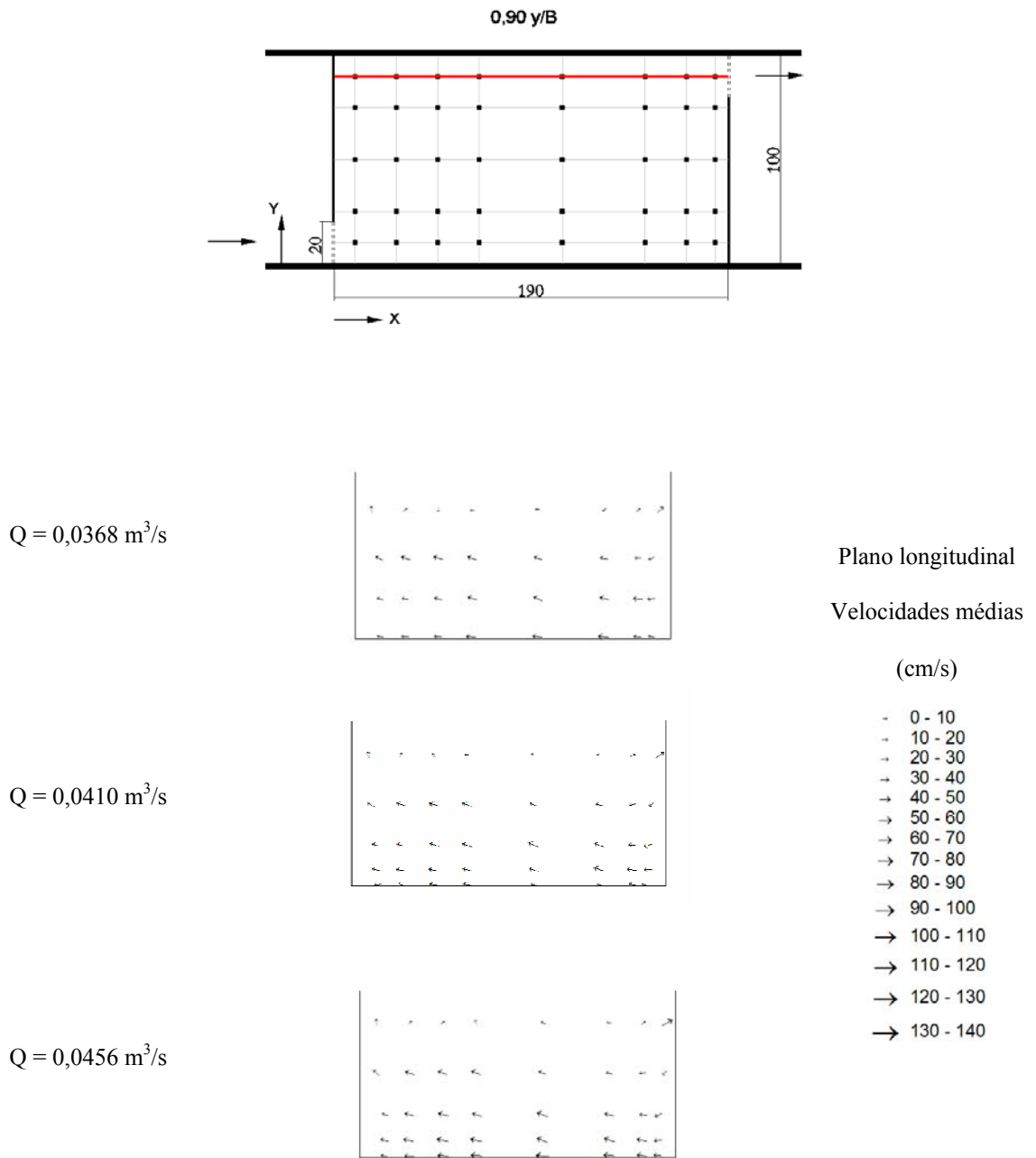


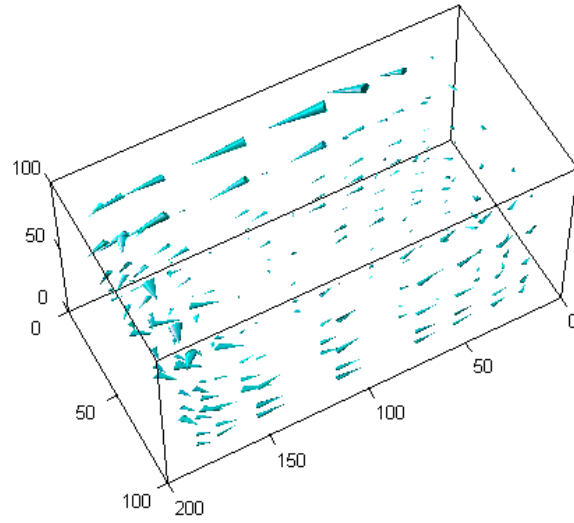
Figura 4.70 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,90 y/B$).

4.3.2.2 *Características gerais do escoamento*

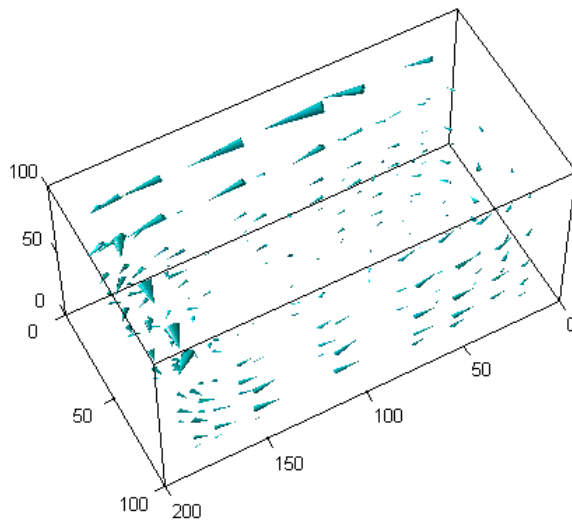
A avaliação das velocidades médias do escoamento em planos paralelos ao fundo e em planos verticais permite definir o padrão geral do fluxo. Observa-se que, para as três vazões ensaiadas, onde as velocidades foram medidas, não ocorrem alterações significativas nas características gerais do mesmo.

As máximas velocidades médias ocorrem no plano paralelo ao fundo situado a $80\%h_m$ (mais superficial), na região do jato que entra no tanque através do descarregador de montante. Esse fluxo de maiores velocidades chega ao defletor de jusante, onde muda de direção, sendo que parte segue no mesmo plano horizontal, junto ao septo, e a outra parte encaminha-se para o fundo do tanque. Em todos os planos observa-se a existência de uma grande recirculação, no sentido do descarregador de montante para o descarregador de jusante. Existem algumas outras correntes observadas nas três vazões ensaiadas, mas que ocorrem com velocidades menores.

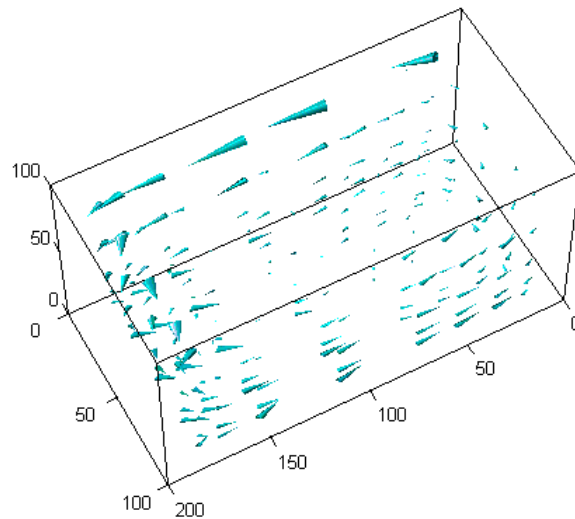
Sob o ponto de vista biológico, acredita-se que se as espécies possuírem condições natatórias para passar pelo descarregador (saltando ou nadando), estes indivíduos encontrarão nos tanques condições adequadas para descansar, já que existem várias regiões com velocidades baixas. Há a necessidade de avaliar se as correntes são suficientes para o indivíduo “perceber” o sentido do escoamento, já que as maiores correntes ocorrem próximas à superfície, na linha do descarregador de montante, e estes se encontram em posições alternadas em defletores consecutivos.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.71 – Esquema do escoamento na escada para peixes com descarregador de superfície: (a) $0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.3.2.3 Campos de energia cinética média

Como comentado anteriormente, a energia cinética média, K (equação (4.3)), expressa de outra maneira o comportamento das componentes médias de velocidade. Os resultados estão apresentados na forma de campos de valores com isolinhas de energia cinética média.

Observa-se na Figura 4.72, Figura 4.73 e Figura 4.74, que para as três descargas ensaiadas, os campos de energia cinética média apresentam uma mesma distribuição de valores, para planos situados nas mesmas distâncias relativas do fundo do canal, com exceção do plano situado a 1 cm do fundo. Como já comentado anteriormente e no Anexo 2, sabe-se que medições muito próximas de fronteiras podem influenciar os resultados, sendo que se desconsidera a diferença observada neste plano, que provavelmente representa problemas na medição.

Os demais planos apresentam resultados com o mesmo comportamento do observado nos campos de velocidades no plano xy . Nos planos situados a $10 h_m$, $25 h_m$ e $50\%h_m$, têm-se valores maiores nas regiões próximas às fronteiras e menores no centro do tanque, caracterizando a grande recirculação que há dentro deste. No plano situado a $80\%h_m$ e $50\%h_m$, tem-se bem definido o escoamento proveniente do descarregador de superfície, com valores mais elevados de energia cinética média.

Na Figura 4.75 são apresentados os valores médios de energia cinética média em cada plano paralelo ao fundo, para as três vazões ensaiadas. Observa-se que os pontos encontram-se dispersos para o plano próximo ao fundo e, próximo à superfície, e nos demais planos, os valores não variam com a vazão. Possivelmente, as diferenças encontradas junto ao fundo e à superfície refletem as dificuldades de medição próximas a obstáculos e na presença de ar incorporado ao escoamento, como ocorre em alguns pontos no plano a $80\%h_m$.

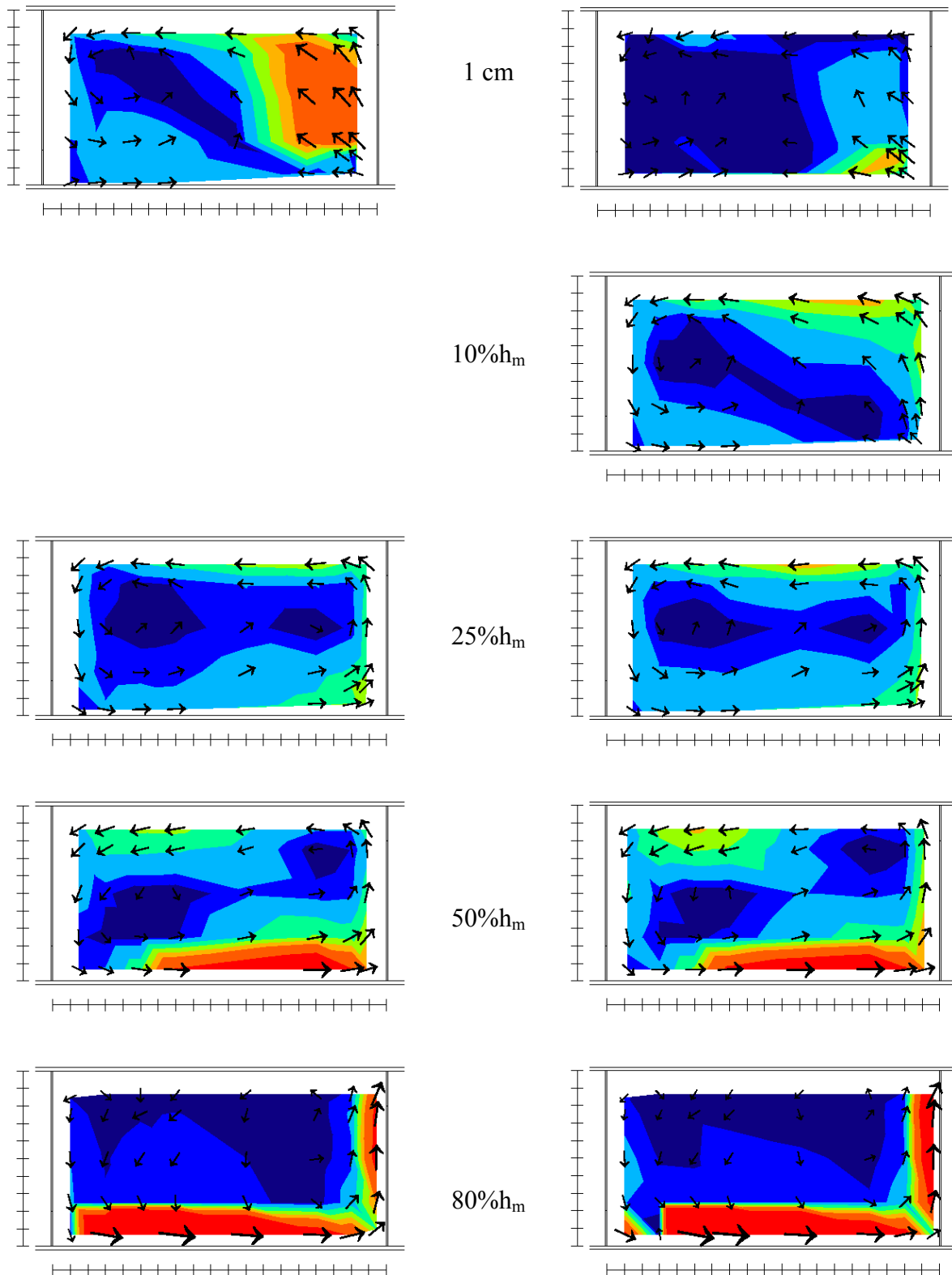


Figura 4.72 – Campo de energia cinética média para $Q=0,036,8 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.73 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

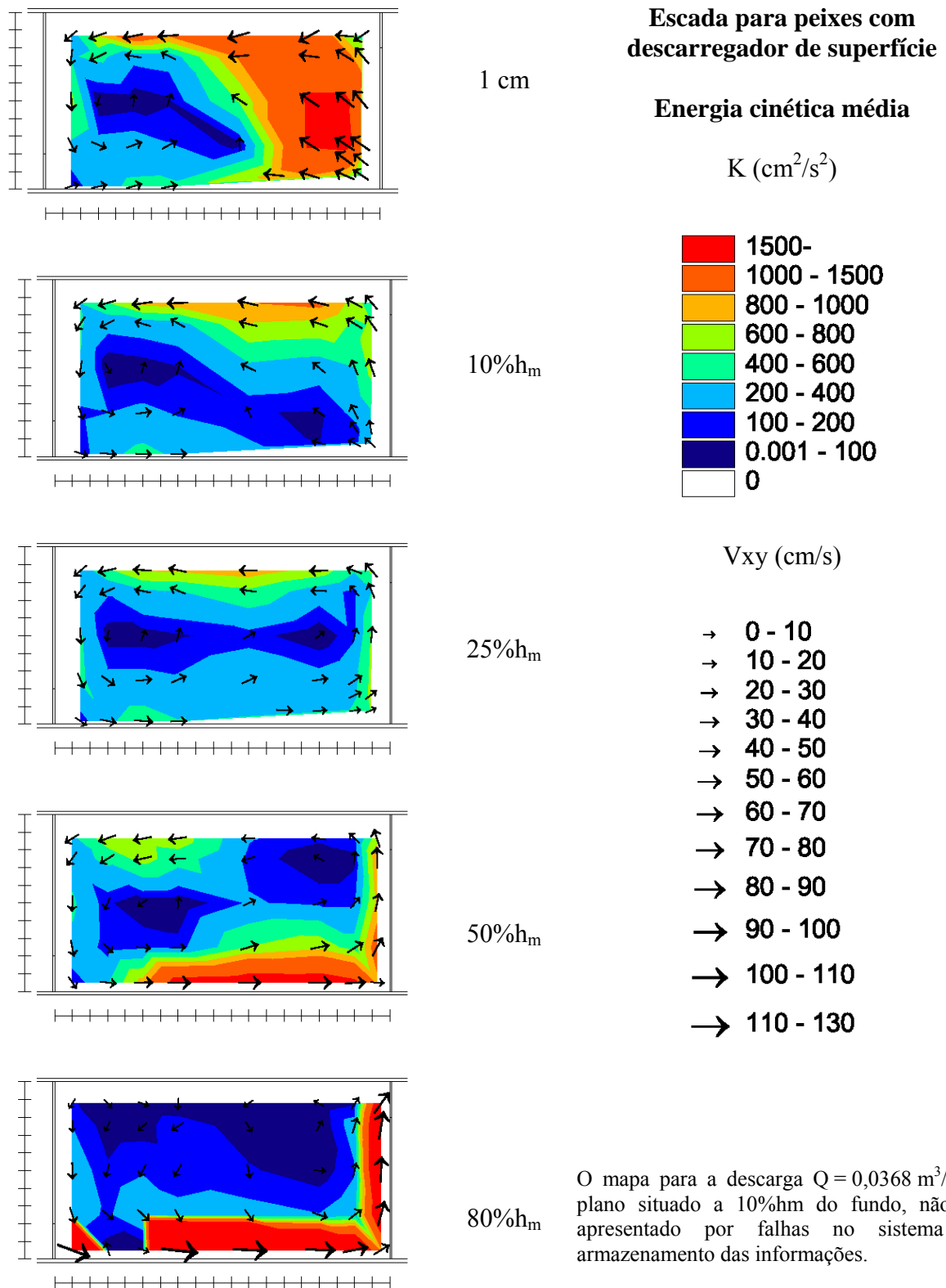


Figura 4.74 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

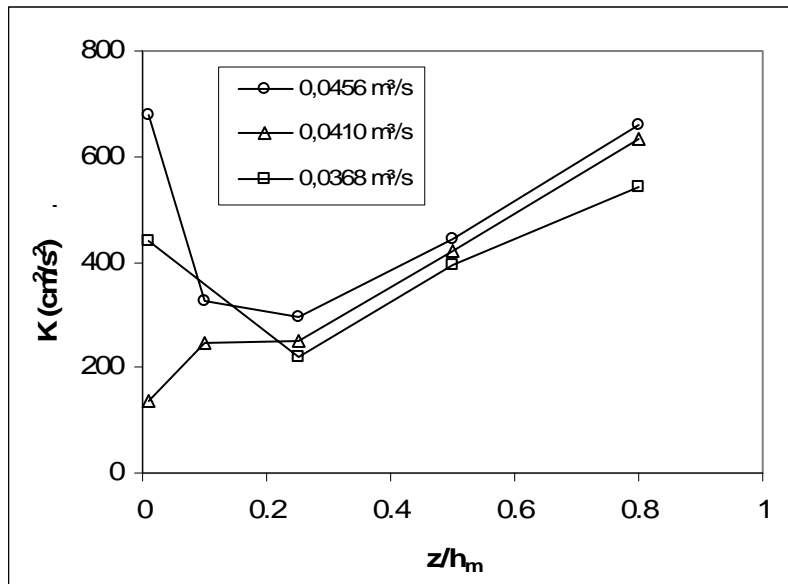


Figura 4.75 – Valores médios de energia cinética média para cada plano paralelo ao fundo no modelo de descarregador de superfície.

4.3.2.4 Campos de energia cinética da turbulência

A energia cinética da turbulência, obtida através da equação (2.41), é uma forma de avaliar as flutuações de velocidade em relação aos valores médios.

Os campos de energia cinética da turbulência, apresentados na Figura 4.76, na Figura 4.77 e na Figura 4.78, mostram que, na maior parte das áreas, os valores são inferiores a $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$. Os valores mais elevados, que atingem até $2000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, ocorrem na região de entrada da água no tanque através do descarregador e no caminho que estas correntes percorrem junto à parede da estrutura. Essas correntes resultam em valores de energia cinética da turbulência mais elevados no plano situado a $80\%h_m$ e um pouco menos na profundidade $50\%h_m$, decorrentes do jato mergulhante no tanque. Observa-se que no plano situado a $50\%h_m$ há uma região de baixos valores de energia cinética da turbulência, logo a frente da posição do descarregador de superfície (cujas soleiras estão acima deste plano), um pouco antes de observar-se o aumento dos valores devido ao jato mergulhante. Essa região apresenta condições mais favoráveis para a aproximação das espécies que apenas nadam (sem habilidades para saltar) durante o caminho de transposição pela estrutura. Esse comportamento foi observado em estudos realizados dentro do projeto “Desenvolvimento e aplicação de uma passagem para peixes destinada a obras transversais fluviais de utilização agrícola”, onde através da avaliação de vídeos e fotos cedidas por membros do projeto, verificou-se que os peixes que optam pela aproximação do descarregador, pela parte inferior, junto ao defletor, têm mais sucesso em relação aos indivíduos que tentam enfrentar o jato proveniente do descarregador. Acredita-se que as características que dificultam uma aproximação frontal (através do jato) relacionam-se aos elevados valores de velocidade, de energia cinética da turbulência e além disso pela presença de ar incorporado no escoamento nesta região. A Figura 4.79 (Cedida por Ana M. Silva do ISA e António Pinheiro do IST) mostra esse caminho preferencial dos peixes ao realizarem a passagem pelo descarregador.

No Anexo 5 apresentam-se os campos de energia cinética da turbulência adimensionalizados em função da velocidade potencial ($k^{0.5}/V_p$).

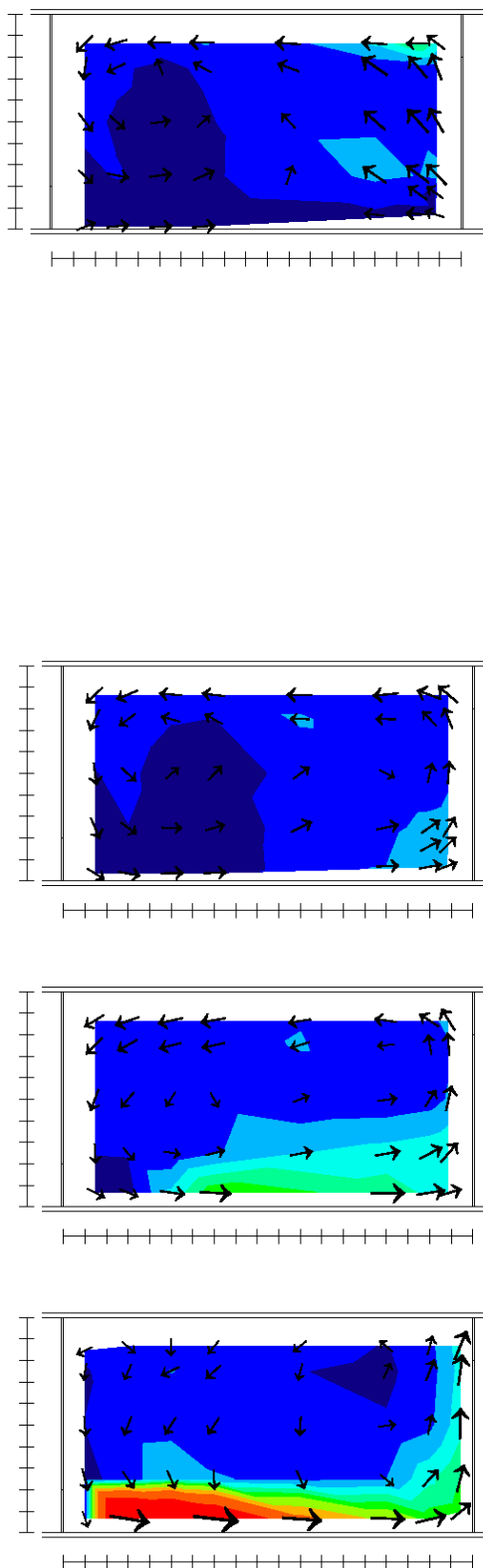


Figura 4.76 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

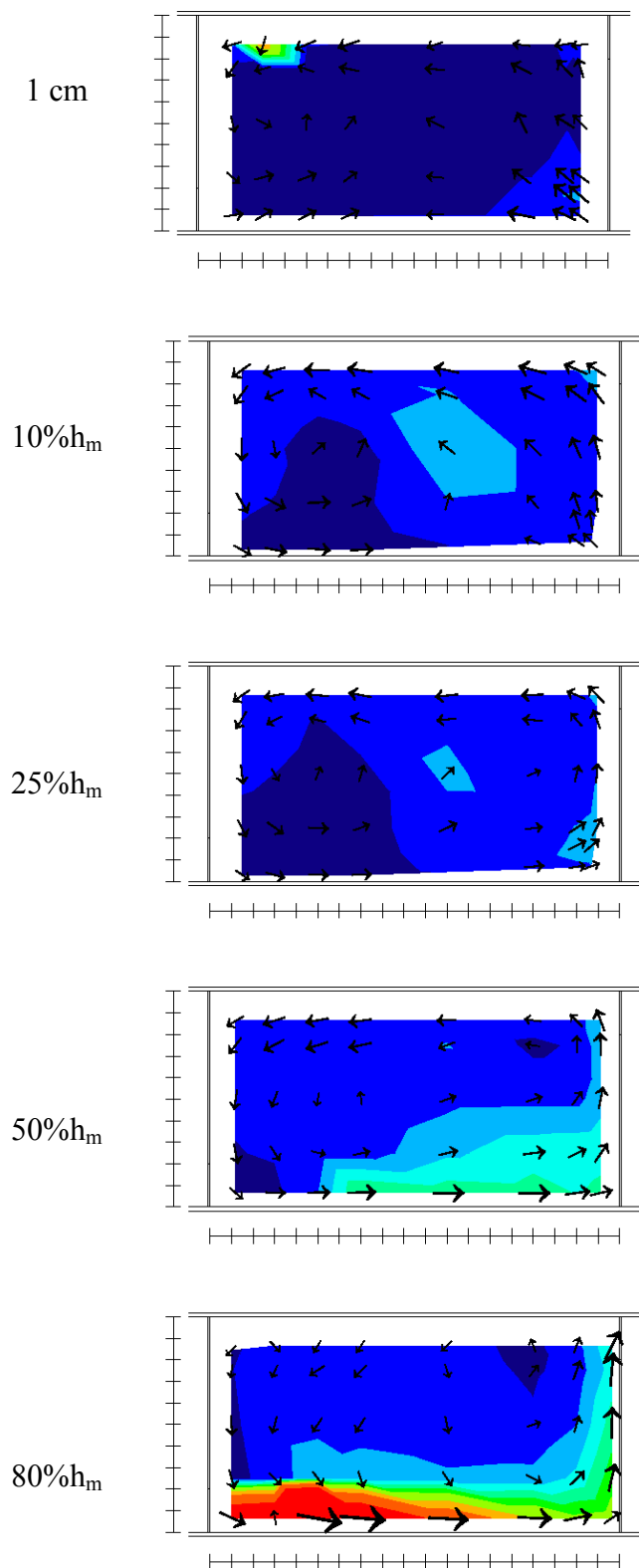


Figura 4.77 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

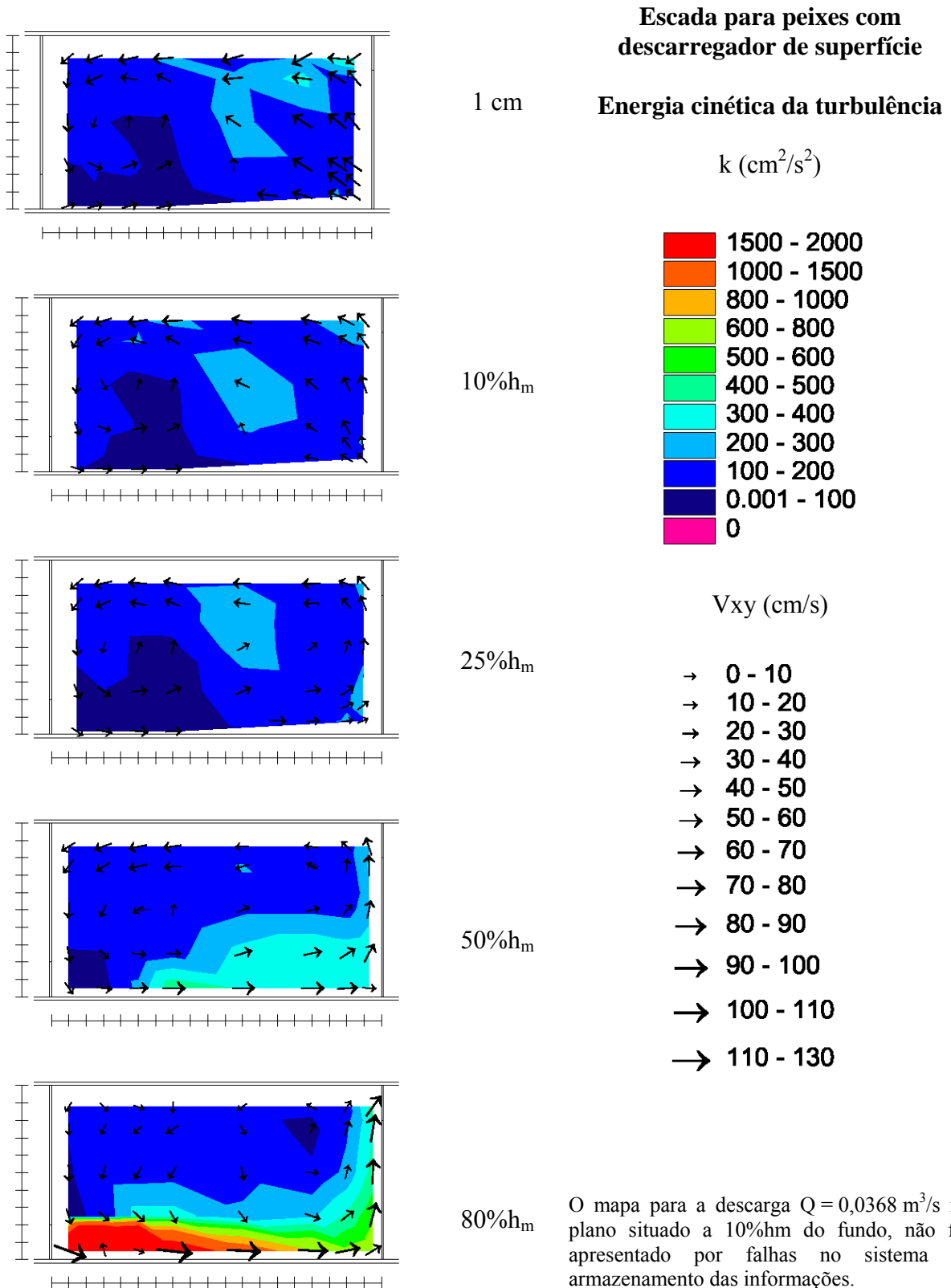


Figura 4.78 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

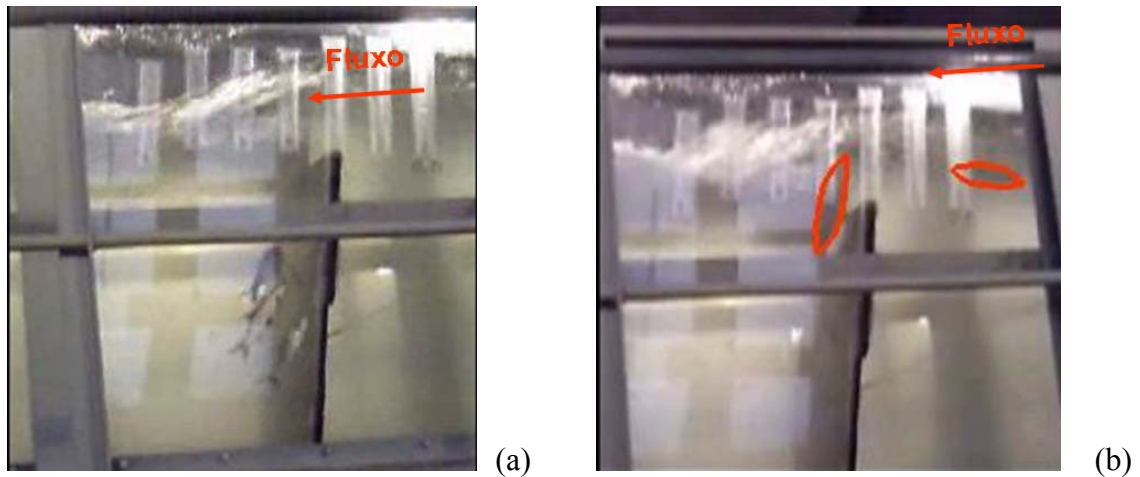


Figura 4.79 – Imagens da trajetória dos peixes (destaque em vermelho) no deslocamento para montante: (a) região de aproximação abaixo do descarregador, entre a parede e o jato mergulhante e (b) peixes passando pelo descarregador. Fotos: Cedidas por Ana M. Silva e António Pinheiro.

A Figura 4.80 apresenta os valores médios de energia cinética da turbulência em cada plano, para as diferentes vazões ensaiadas. Para os planos situados a $10 h_m$, $25 h_m$ e $50\%h_m$ têm-se valores muito semelhantes para diferentes vazões. No plano mais próximo do fundo há certa dispersão, como encontrado nas demais avaliações, proveniente das limitações de medições próximas às fronteiras. No plano mais superficial observam-se valores mais elevados para as descargas maiores.

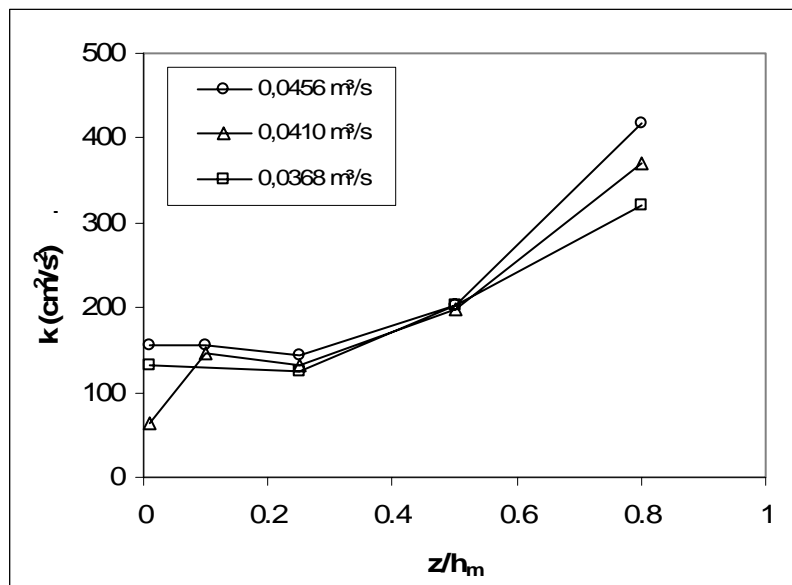


Figura 4.80 – Valores médios da energia cinética da turbulência para cada plano paralelo ao fundo do modelo de descarregador de superfície.

4.3.2.5 Campos de intensidades da turbulência

A intensidade da turbulência (IT) representa a relação entre as flutuações de velocidade e o valor médio temporal (Eq. (4.5)). A Figura 4.81, a Figura 4.82 e a Figura 4.83 mostram que, de uma forma geral, o comportamento dos campos de intensidade da turbulência são semelhantes para as diferentes vazões, comparando-se planos situados nas mesmas profundidades relativas. Em todos os planos, tem-se, no centro do tanque, valores maiores, onde as velocidades médias são menores, resultado de flutuações de velocidades mais significativas em relação ao valor médio. Para as duas maiores vazões, no plano mais superficial, observam-se altos valores de IT na região em frente ao descarregador de superfície, que representam pontos de medição em locais do escoamento com ar incorporado, sendo que os valores obtidos provavelmente estão superestimados.

A avaliação dos valores médios de intensidade da turbulência em cada plano, para as diferentes vazões, como apresentado na Figura 4.84, demonstra que estes são independentes das vazões e variam pouco entre as profundidade de 1 cm, 10% hm, 25% hm e 50%hm. O plano mais próximo da superfície apresenta alta dispersão dos valores, onde são influenciados pela região de maiores magnitudes de IT, junto ao descarregador de superfície. Para a menor vazão, onde não foi observada esta região de valores muito elevados, tem-se que o valor médio no plano é apenas um pouco superior aos valores médios obtidos no plano 50% hm.

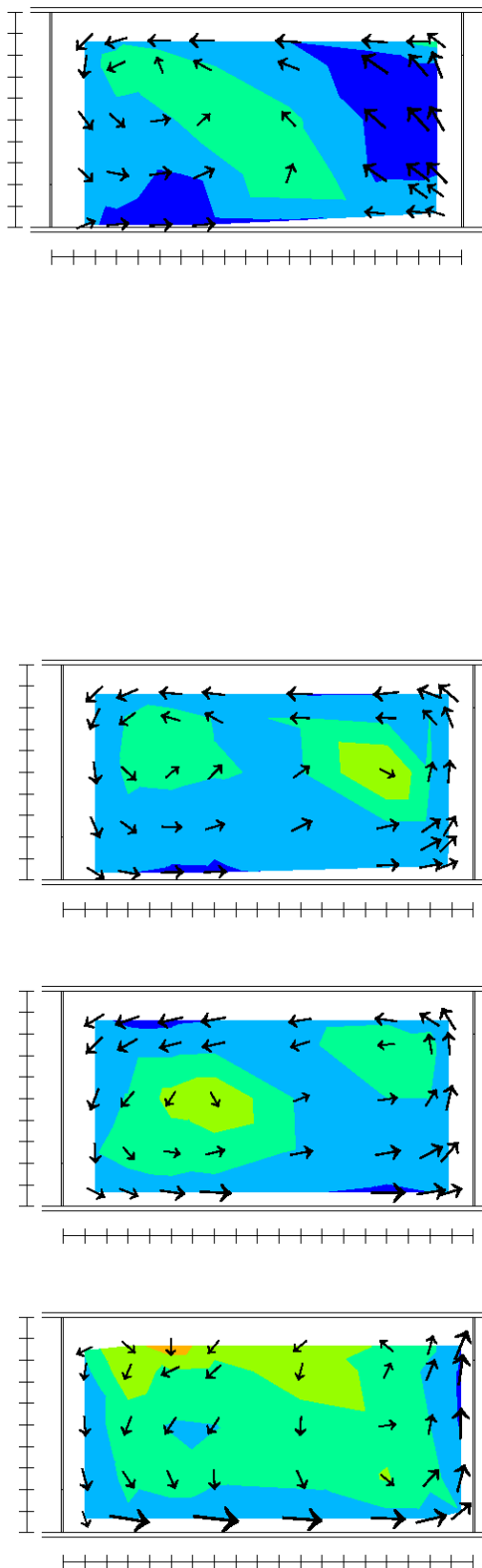


Figura 4.81 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

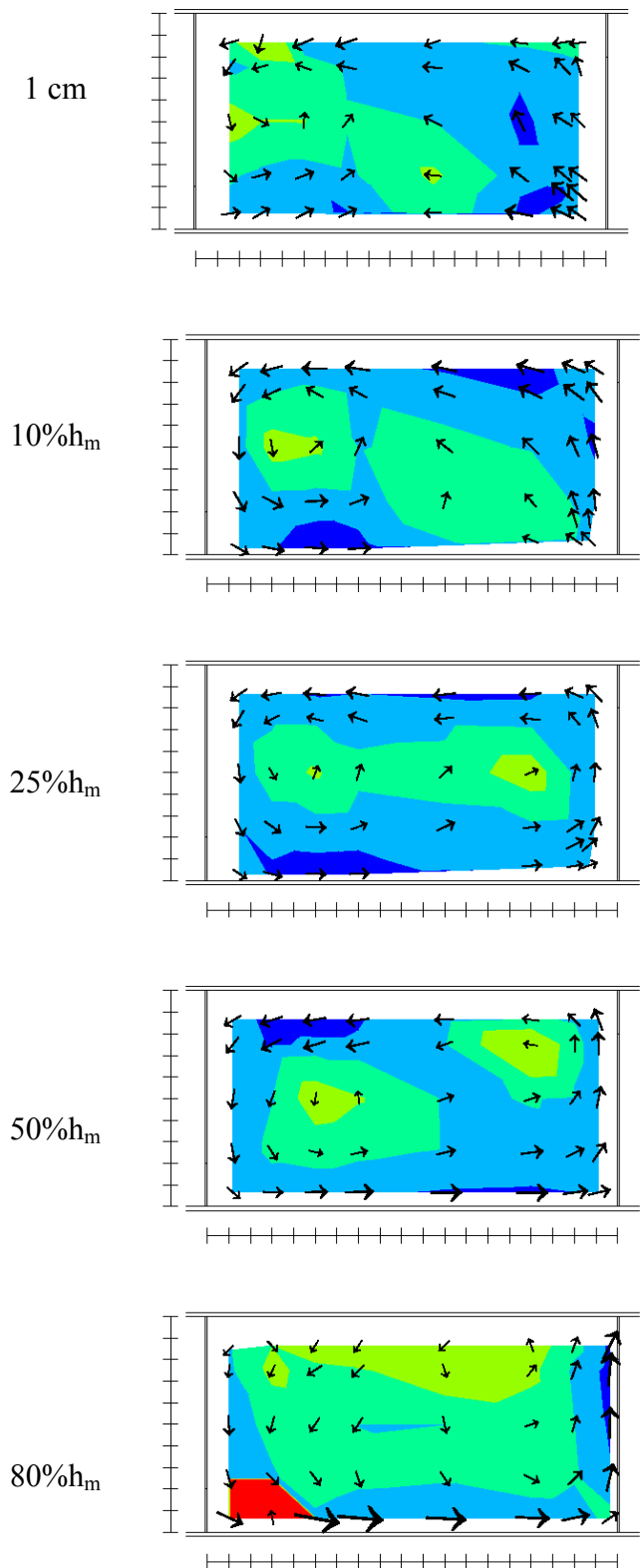


Figura 4.82 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

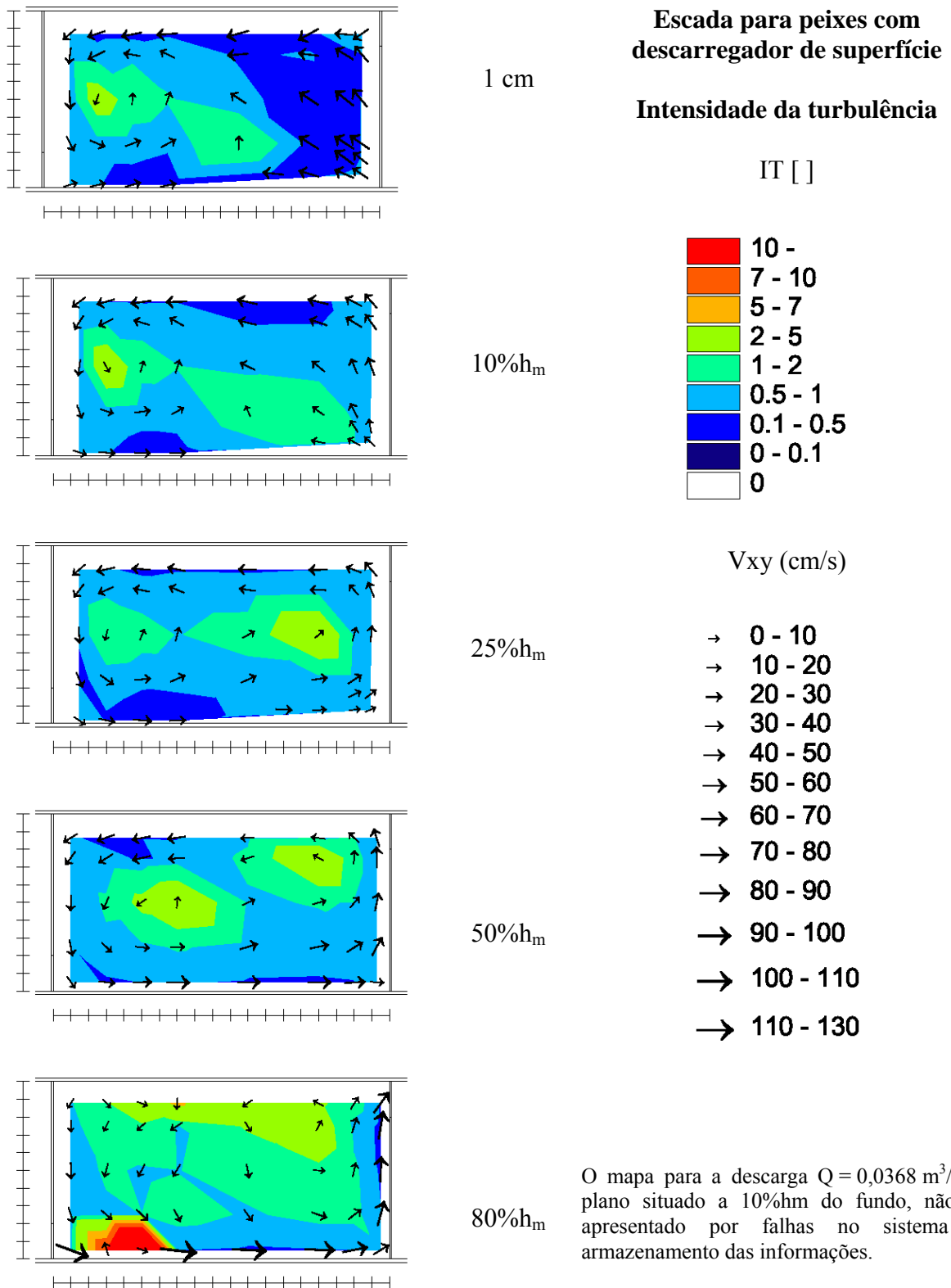


Figura 4.83 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

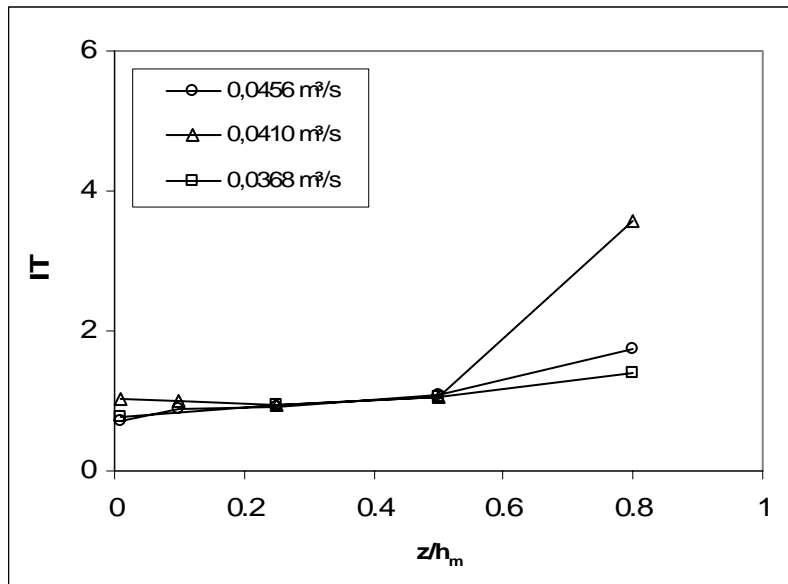


Figura 4.84 – Valores médios de intensidade da turbulência para cada plano paralelo ao fundo no modelo de descarregador de superfície.

4.3.2.6 Campos de tensões de Reynolds

Os campos das tensões de Reynolds podem ser avaliados para os três planos (xy, xz, yz). Aqui se apresentam as tensões de Reynolds no plano xy (componentes horizontais), onde, nesta estrutura, encontram-se os maiores valores (Figura 4.85, Figura 4.86 e Figura 4.87). A avaliação desses campos indica um comportamento da distribuição dos valores, nos planos paralelos ao fundo, muito semelhante ao observado para os valores da energia cinética da turbulência.

Observa-se o mesmo comportamento dos campos de tensões de Reynolds para as diferentes vazões. Na maior parte do tanque os valores estão entre -5 e 5 N/m². Na região em frente ao descarregador de superfície, no caminho do escoamento do jato mergulhante, os valores chegam a 30 N/m². Na posição mais próxima do descarregador, antes do local do mergulho do jato no tanque, os valores da tensão de Reynolds também apresentam um módulo elevado, mas no sentido contrário. Observa-se que o aumento da vazão resulta no aumento da região com valores de tensões de Reynolds negativas, junto à aproximação do descarregador de jusante e na região junto ao descarregador de montante.

A avaliação dos valores médios das tensões de Reynolds em planos paralelos ao fundo, para as três vazões, apresenta-se na Figura 4.88. Verifica-se para os diferentes planos, com exceção do mais superficial, que os valores médios em cada plano para as diferentes vazões, apresentam valores próximos, que aumentam para planos mais afastados do fundo.

Para o plano mais superficial (80%hm) têm-se valores bastante dispersos, que não estão relacionados com as vazões.

Este gráfico serve apenas para verificar se o comportamento nas três vazões pode ser considerado semelhante, reforçando a avaliação visual dos campos de distribuição de tensão de Reynolds. Observa-se que os valores médios são baixos, refletindo as grandes áreas de valores reduzidos e a distribuição de valores de tensões de Reynolds em sentidos contrários.

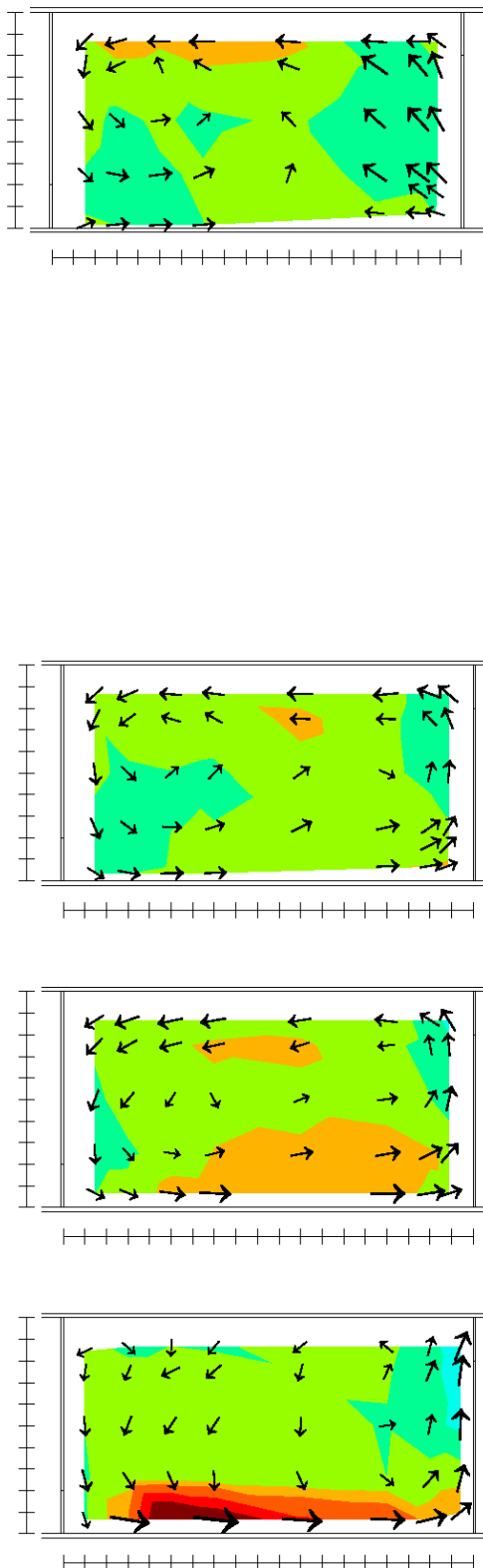


Figura 4.85 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

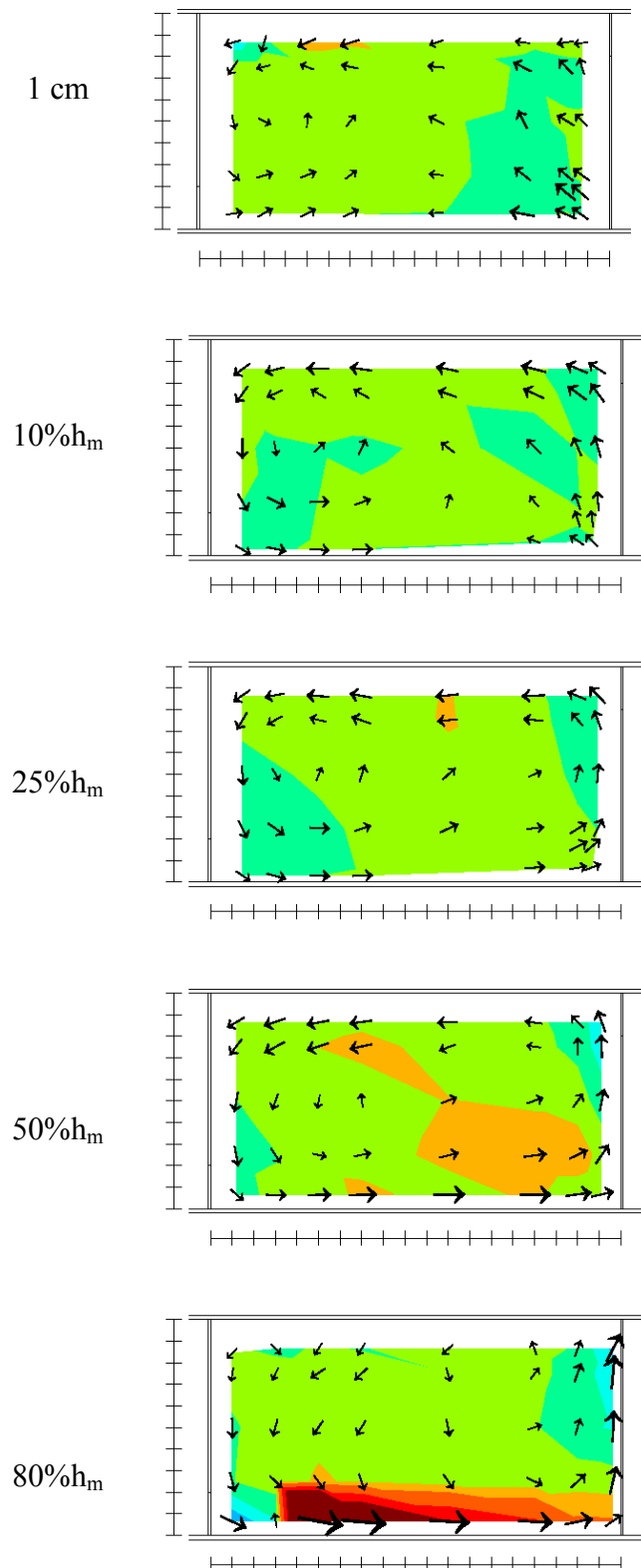


Figura 4.86 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

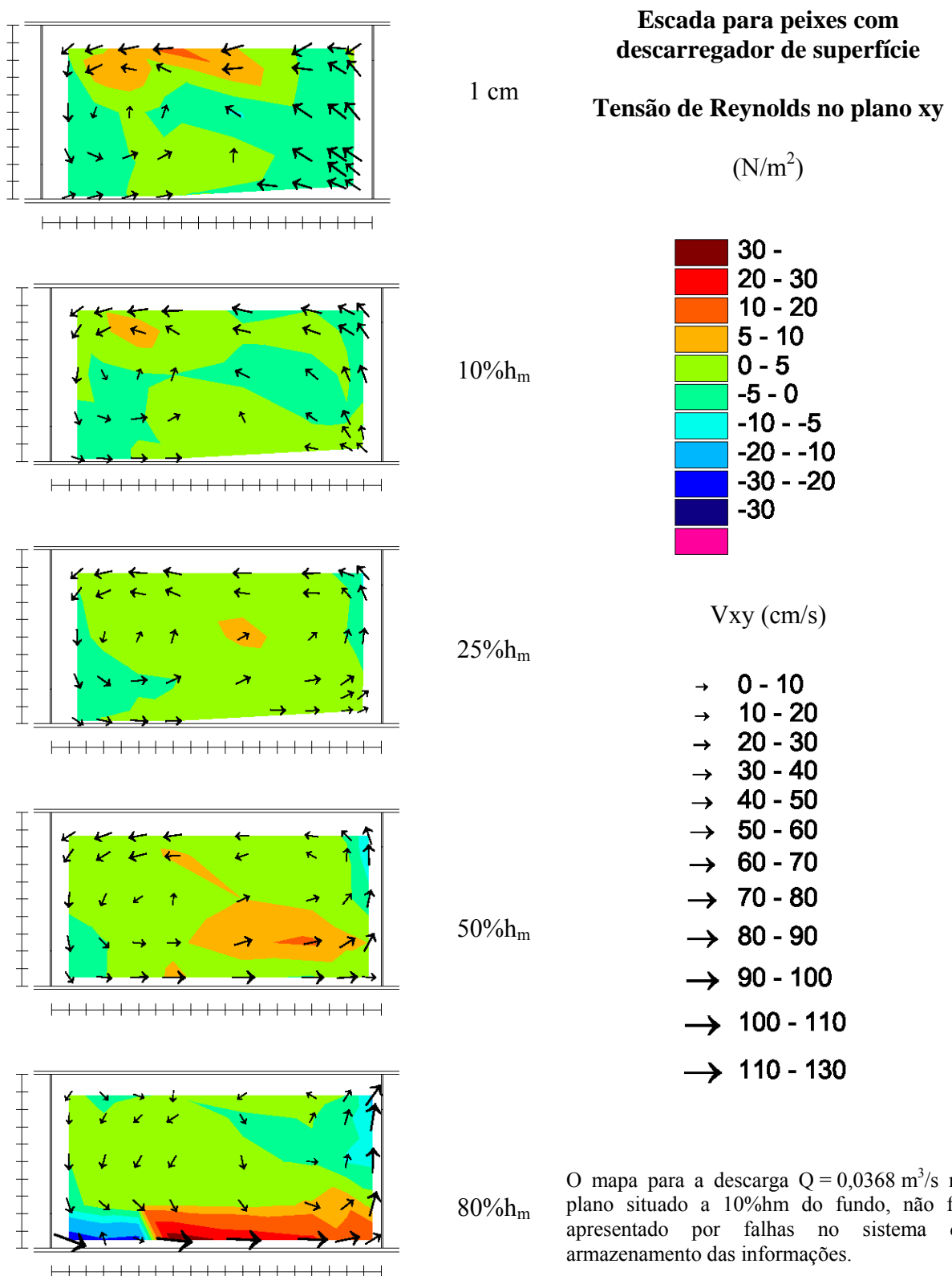


Figura 4.87 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com descarregador de superfície, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

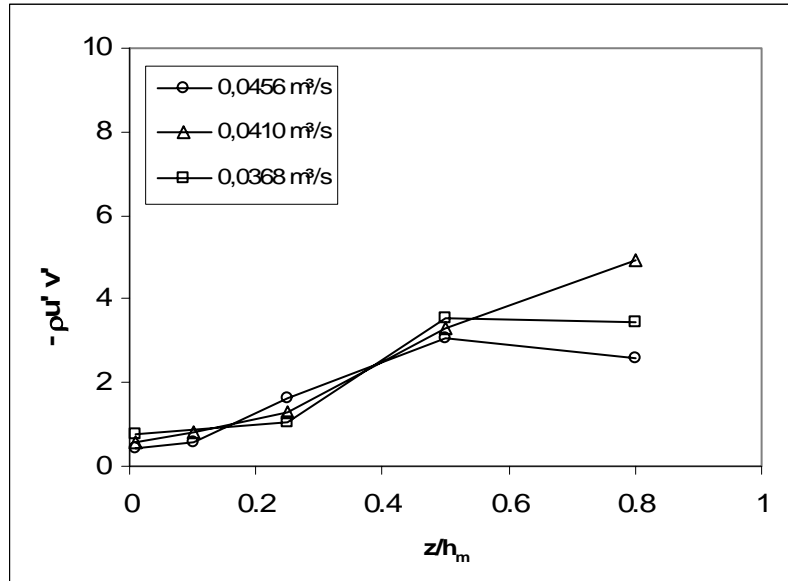


Figura 4.88 – Valores médios das tensões de Reynolds (N/m^2) no plano xy para cada plano paralelo ao fundo no modelo de descarregador de superfície.

4.4 Estrutura B2– MTP com Orifício de Fundo

4.4.1 Coeficiente de Descarga

O coeficiente de descarga na passagem para peixes com orifícios de fundo pode ser calculado através da equação (2.10):

$$Q = C_d A \sqrt{2g\Delta H} \quad (2.10)$$

Sendo: C_d o coeficiente de descarga do orifício; A a área dos orifícios; g a aceleração da gravidade e Δh a diferença de nível entre tanques consecutivos.

Larinier (1992) comenta que orifícios com a parte de montante arredondada podem resultar em coeficientes de descarga maiores, variando entre 0,65 e 0,85. Outros fatores também influenciam o coeficiente de descarga em passagens para peixes por orifícios, como sua forma, a localização do mesmo e a espessura do defletor em que está inserido. A Figura 4.89 apresenta a variação dos coeficientes de descarga com a vazão para o modelo com orifícios de fundo, conforme descrito no capítulo 3. Observa-se que, para as vazões testadas, os coeficientes de descarga ficam, aproximadamente, entre 0,58 e 0,60. Pode-se considerar para esta estrutura o coeficiente de descarga constante, independente da vazão.

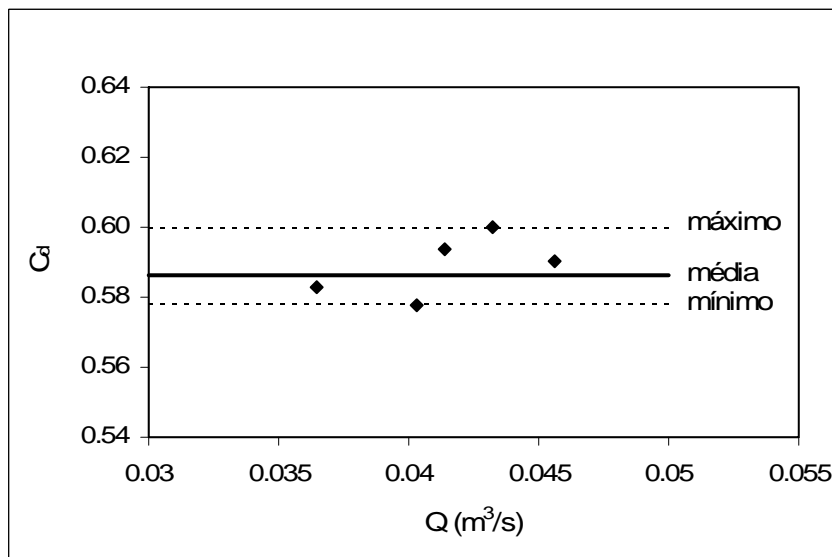


Figura 4.89 – Coeficientes de descarga da escada para peixes com orifícios de fundo para diferentes vazões.

4.4.2 Velocidades e Turbulência

4.4.2.1 Campos de velocidades médias

Avaliando inicialmente as componentes horizontais de velocidade nos planos paralelos ao fundo (Figura 4.90, Figura 4.91 e Figura 4.92), verifica-se para as três vazões ensaiadas um mesmo padrão característico.

Nos planos situados a 1 cm do fundo, observa-se uma grande recirculação alimentada pelo escoamento proveniente do orifício de fundo. As maiores velocidades ocorrem na linha do orifício de fundo de montante, seguem até encontrar com o septo de jusante, mudando de direção e mantendo valores altos de velocidade, em relação a outras regiões do tanque. Parte do escoamento encaminha-se para o orifício de jusante e parte alimenta a recirculação do escoamento dentro do tanque.

No plano situado a $10\%h_m$ apresentam-se as mesmas características dos vetores de velocidade encontrados no plano mais próximo ao fundo, no entanto estão mais bem organizados. Observa-se o caminho do escoamento de um orifício a outro e a grande recirculação no tanque.

Nos demais planos ($25\%h_m$, $50\%h_m$ e $75\%h_m$), tem-se a recirculação do escoamento dentro do tanque, com velocidades menores às observadas nos outros dois planos que ficam sob influência direta do escoamento entre os orifícios. As velocidades nesses planos são maiores na parte externa da recirculação, com valores que não ultrapassam 60 cm/s, e um pouco inferiores no centro do tanque.

Os campos de velocidades médias foram adimensionalizados utilizando a velocidade potencial ($\sqrt{2g\Delta h}$), considerada, simplificada, como a máxima velocidade esperada. Os mapas do comportamento de velocidade adimensionalizada apresentam-se no Anexo 4.

Observa-se que a escada para peixes com orifício de fundo, do mesmo modo que observado na passagem por descarregador de superfície, apresenta, na maior parte do tanque, escoamento com velocidades bastante inferiores à velocidade potencial. Nos planos que não estão sob influência direta do orifício (situados acima da altura deste), têm-se relações V/V_p inferiores a 30%. Nos planos mais próximos ao fundo (1 cm e $10\%h_m$), sob influência do fluxo principal proveniente do orifício, têm-se regiões com relações V/V_p de até 50%.

Esta configuração da relação V/V_p no tanque mostra que, provavelmente, as espécies que conseguirem passar pelos orifícios não encontrarão dificuldades dentro dos tanques em relação a valores muito elevados de velocidade. No entanto, sabe-se que é necessário um fluxo de atração mínimo, que indique aos peixes o caminho a seguir. Não se pode afirmar que o fluxo de atração seja suficiente para a orientação do peixe no caminho para montante, já que

as velocidades dentro da maior parte do tanque demonstraram-se tão baixas. Esse tipo de questão poderá ser mais bem compreendida com estudos experimentais empregando diferentes espécies de peixes.

Nas mesmas figuras (Figura 4.90, Figura 4.91 e Figura 4.92) onde são apresentados os vetores de velocidade nos planos paralelos ao fundo, são apresentadas as componentes verticais em escalas de cores. Os valores positivos representam o fluxo ascensional, e os negativos, o fluxo descensional. Nos planos mais próximos ao fundo, situados a 1 cm e $10\%h_m$, as componentes verticais são pouco expressivas, com valores na maior parte entre -5 e 5 cm/s. Na região de saída de água pelo orifício de jusante, no plano situado a $10\%h_m$, observa-se fluxo descensional, com velocidades de até -30 cm/s. Nos demais planos, observa-se a existência de componentes verticais com valores entre -30 cm/s e 20 cm/s, não se identificando um padrão geral para o comportamento. A seguir, na avaliação dos planos verticais transversais e longitudinais, procura-se verificar algum padrão significativo de fluxo vertical.

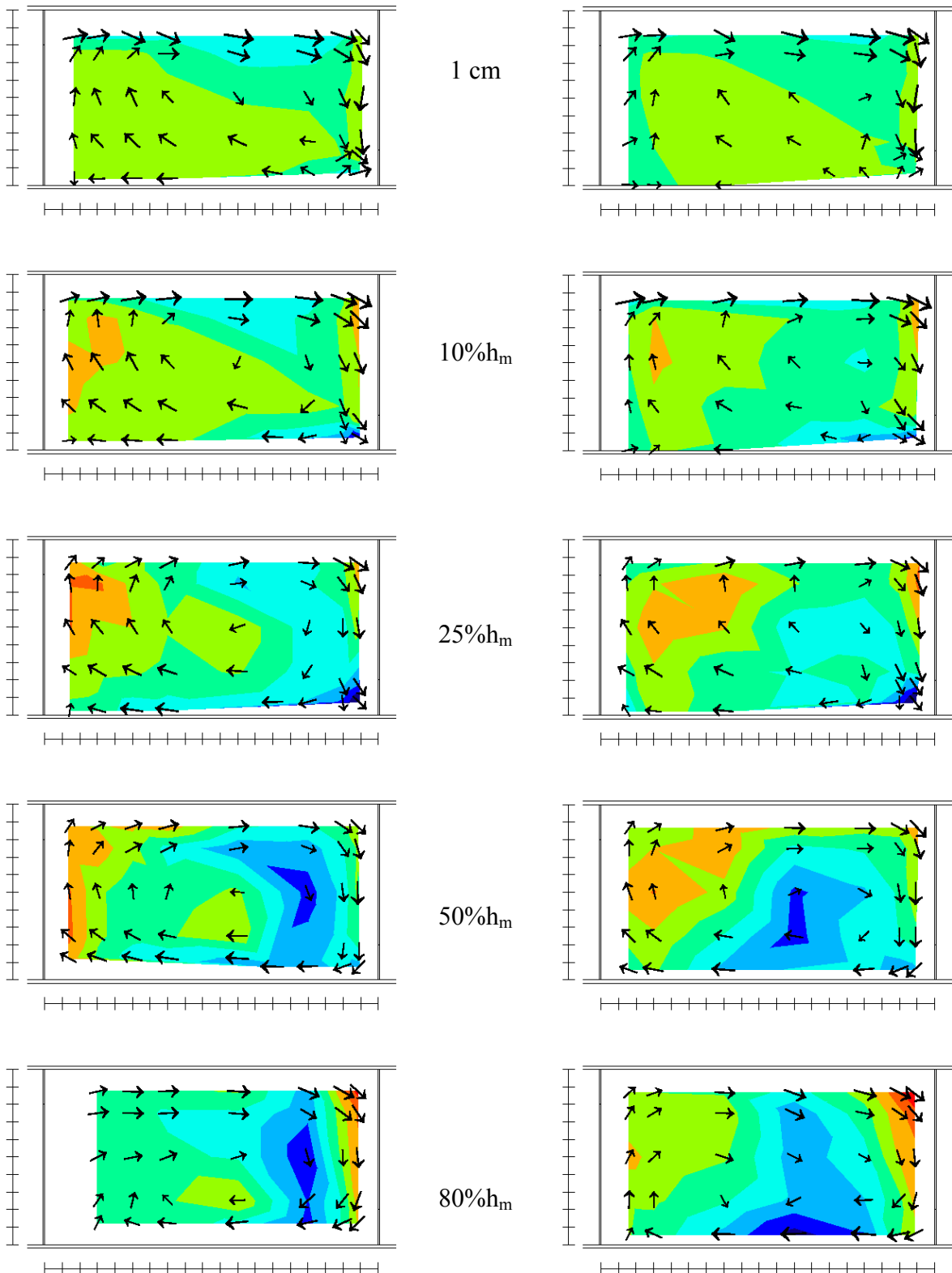


Figura 4.90 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.91 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

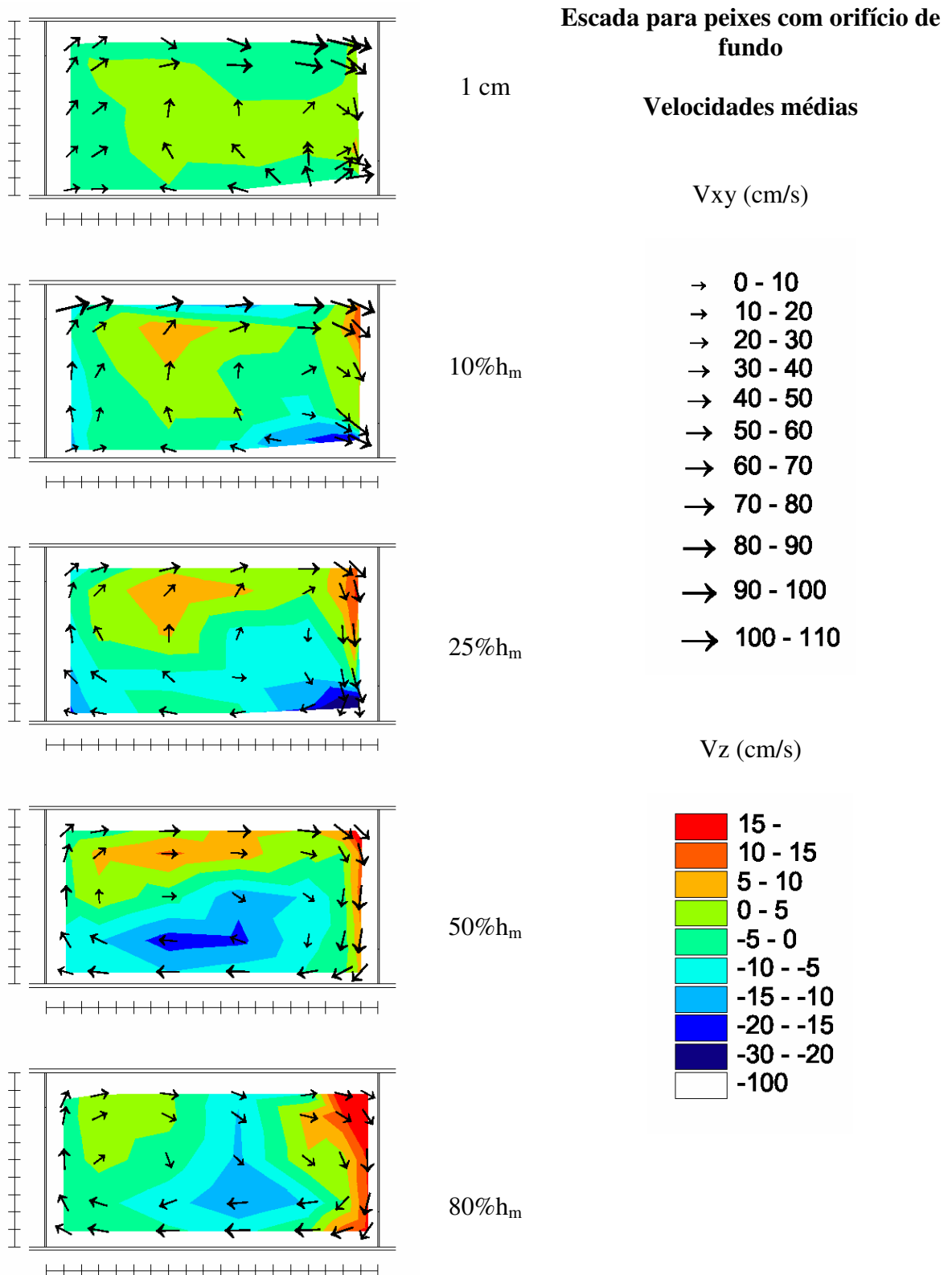


Figura 4.92 – Campo de velocidades médias (cm/s) para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

Foram selecionados alguns planos transversais e longitudinais para a verificação de possíveis padrões verticais do escoamento dentro do tanque desta estrutura.

A Figura 4.93 mostra um plano transversal ao tanque em uma posição próxima ao septo de montante ($X=0,16 x/L$), onde podem ser verificadas componentes correspondentes à grande recirculação que ocorre no plano horizontal. Observam-se alguns vetores com componentes verticais, mas não se identifica, nesse plano, um comportamento característico para as três descargas.

No plano apresentado na Figura 4.94 ($X=0,58 x/L$), situado próximo ao centro do tanque, observam-se componentes verticais, mas não se definem características predominantes para todas as vazões. Para as duas vazões maiores (Figura 4.94b, c) observa-se uma recirculação no sentido horário, mas como não se observa para a menor vazão, não pode ser associada a uma característica geral do escoamento nesta estrutura.

Nos planos próximos ao defletor de jusante apresentados na Figura 4.95 ($X=0,90 x/L$), observa-se o mesmo comportamento para as três descargas ensaiadas. As medições mais próximas da superfície indicam a tendência ascensional do fluxo, provavelmente devido ao “impacto” com o defletor de jusante, e então a tendência de uma leve sobrelevação do fluxo. Observa-se o fluxo se encaminhando para o orifício, junto à parte inferior e, no restante deste plano, a maioria dos vetores apresentam pouca contribuição de componentes verticais.

Nos planos longitudinais observa-se que há uma maior concordância entre os padrões obtidos em um mesmo plano para as diferentes descargas.

A Figura 4.96 mostra o comportamento dos vetores de velocidade em um plano longitudinal ($Y=0,10y/B$), na linha do fluxo do orifício de jusante do tanque, para as três descargas ensaiadas. Pode-se verificar o fluxo descendente, junto ao defletor de jusante, encaminhando-se para o orifício; o restante do escoamento segue no sentido contrário, correspondente ao fluxo da grande recirculação de eixo vertical, com componentes verticais desprezíveis. Próximo ao defletor de montante, observam-se alguns vetores com o sentido contrário a este fluxo principal, principalmente para as menores profundidades, indicando que o escoamento que chega ao defletor de montante tem a tendência de, além de continuar alimentando a recirculação de características predominantes horizontais, encaminhar-se para o fundo do tanque. Neste plano observa-se que em alguns pontos não foram realizadas medições de velocidades, por questões construtivas do modelo que impossibilitavam a aproximação do equipamento em certas posições.

No plano $Y=0,25y/B$ (Figura 4.97), têm-se características semelhantes às observadas no plano $Y=0,10y/B$, com os vetores de velocidade levemente de menor magnitude. Observa-

se que para a menor descarga (Figura 4.97a), as componentes de velocidade vertical são praticamente desprezíveis, já para a maior vazão (Figura 4.97c), pode-se verificar claramente que além do fluxo horizontal, de jusante para montante (proveniente da recirculação), há correntes descensionais no mesmo sentido.

A Figura 4.98 apresenta o campo de vetores de velocidades no plano longitudinal no centro do tanque ($Y=0,50y/B$). Observa-se, através do comportamento neste tanque que há a formação de uma recirculação no sentido do escoamento (montante-jusante) com velocidades que não ultrapassam 26 cm/s (no plano xz). Fora dessa recirculação, observam-se componentes de velocidade provenientes do escoamento do orifício de montante e do fluxo que se encaminha para o orifício de jusante.

No plano $Y=0,75y/B$ (Figura 4.99) verifica-se a influência do escoamento proveniente do orifício de montante, com maiores velocidades junto ao fundo, e fluxo principal de montante para jusante, com a tendência do escoamento ascensional.

No plano localizado da linha do orifício de montante ($Y=0,90y/B$, Figura 4.100) verifica-se escoamento predominantemente paralelo ao fundo, no sentido montante-jusante, com maiores velocidades nas profundidades que se encontram dentro da área de influência direta do orifício (1 cm e $10\%h_m$ do fundo). Nesse plano verificam-se as maiores velocidades do tanque, sendo que foram medidas velocidades que chegam a, até, 105 cm/s.

As velocidades medidas dentro do tanque não são as máximas velocidades presentes na passagem para peixes com orifícios de fundo. Existem velocidades maiores em regiões mais próximas ao orifício e na seção deste, que não puderam ser medidas com o equipamento disponível. No entanto, esses valores podem ser estimados teoricamente conforme apresentado na Tabela 4.5.

A velocidade média do escoamento na seção do orifício pode ser avaliada através da equação da continuidade ($Q = V \cdot A$). A máxima velocidade esperada pode ser obtida, de forma simplificada, através da equação da velocidade potencial ($V = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$). A Tabela 4.5 apresenta os valores teóricos da velocidade média e da velocidade máxima na seção do orifício, para as descargas avaliadas.

Tabela 4.5 – Valores característicos das velocidades na escada para peixes com orifícios de fundo.

| Q (m ³ /s) | Δh (m) | A _o (m ²) | V med (cm/s) | V max (cm/s) | Vmax/Vmed | V max tanque |
|-----------------------|--------|----------------------------------|--------------|--------------|-----------|--------------|
| 0,0365 | 0,125 | 0,04 | 0,91 | 1,57 | 1,72 | 0,80 |
| 0,0403 | 0,155 | 0,04 | 1,01 | 1,75 | 1,73 | 0,79 |
| 0,0456 | 0,190 | 0,04 | 1,14 | 1,93 | 1,69 | 1,04 |

Onde: Δh é o desnível entre tanques consecutivos; A_o é a área do orifício (0,04 m²); V med é a velocidade média na seção do orifício, obtido pela equação da continuidade; V max é a velocidade máxima na seção do orifício, dada por $V = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$ e V max tanque é a máxima velocidade média medida no tanque.

Através da Tabela 4.5 observa-se que a velocidade máxima (potencial) na seção do orifício é, em geral, 70% superior ao valor médio obtido pela equação da continuidade.

As máximas velocidades dentro do tanque são apresentadas na Figura 4.101 em função da profundidade relativa. Observam-se, como já mencionado anteriormente, as maiores velocidades dentro do tanque nos pontos mais próximos do fundo (planos distantes 1 cm e 10%h_m). Nessas posições, verifica-se que as maiores velocidades médias ocorrem para as maiores descargas, indicando uma relação entre descargas e velocidades máximas. Avaliando as máximas velocidades médias medidas nas profundidades 25% h_m, 50% h_m e 80%h_m, verifica-se que não ocorrem variações em função da vazão. Pode-se dizer que o aumento da vazão acarreta velocidades maiores na região sob influência do escoamento direto do orifício e, para as demais regiões do tanque, não há alterações na magnitude das velocidades.

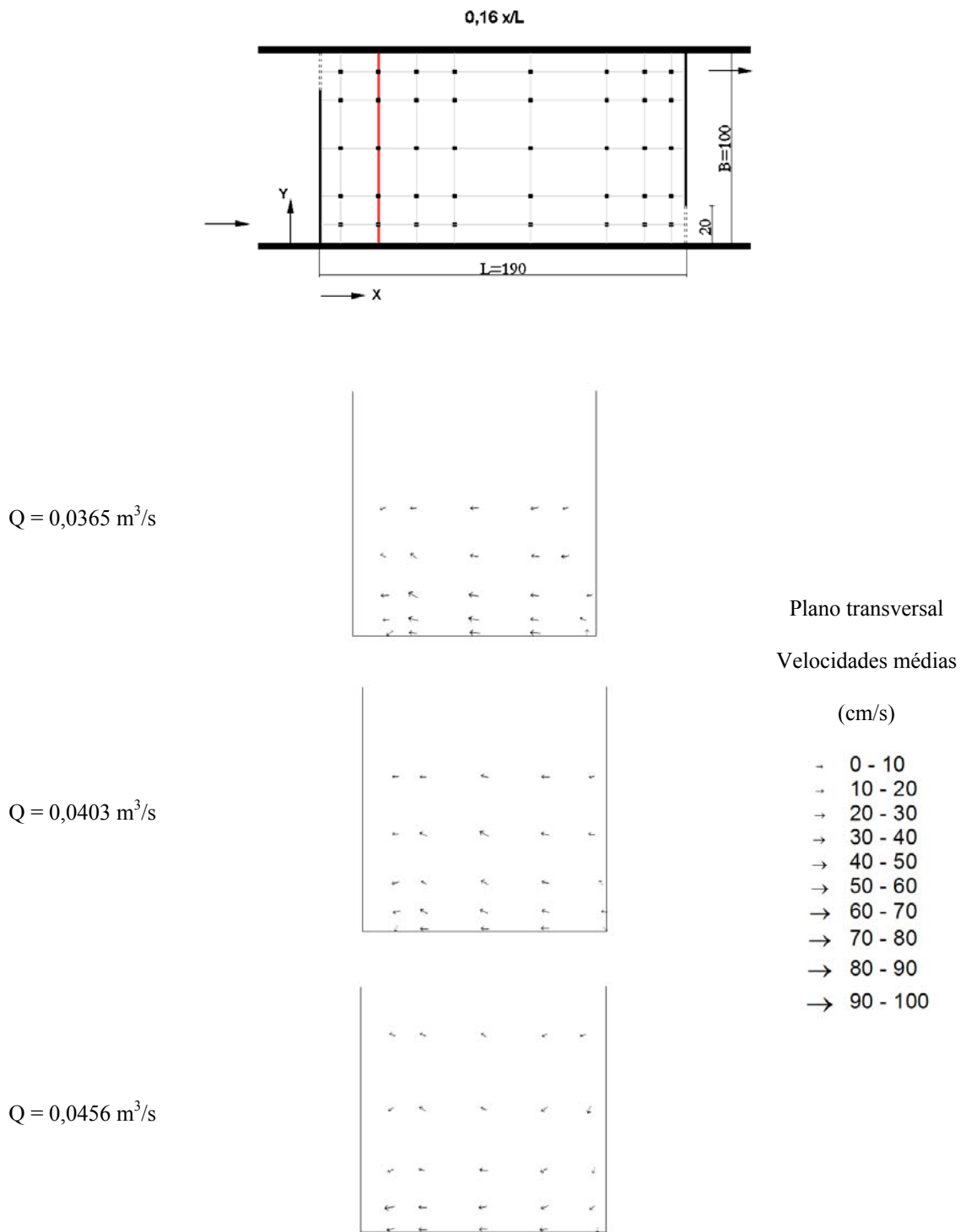


Figura 4.93 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,16 \times L$).

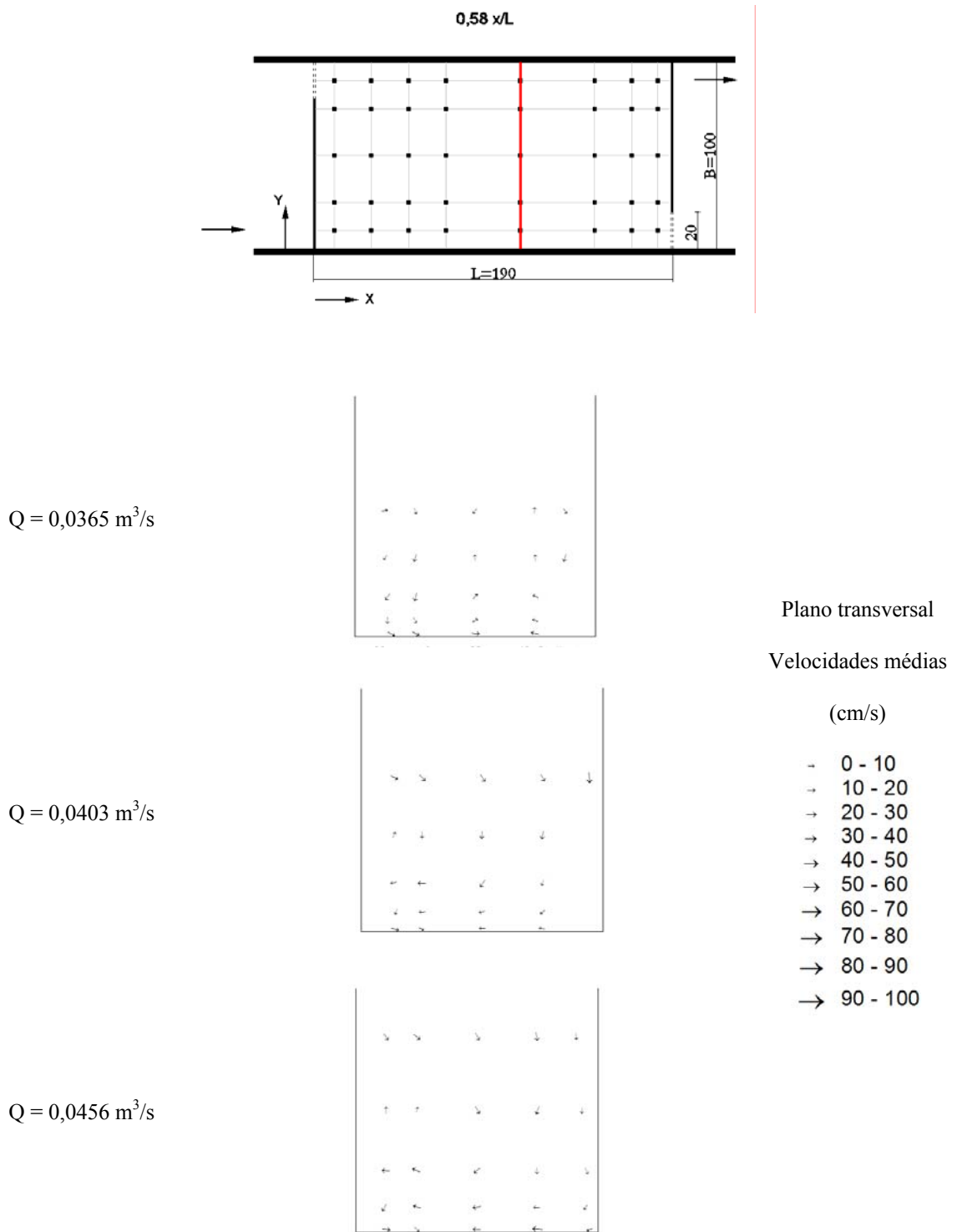


Figura 4.94 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,58 \times L$).

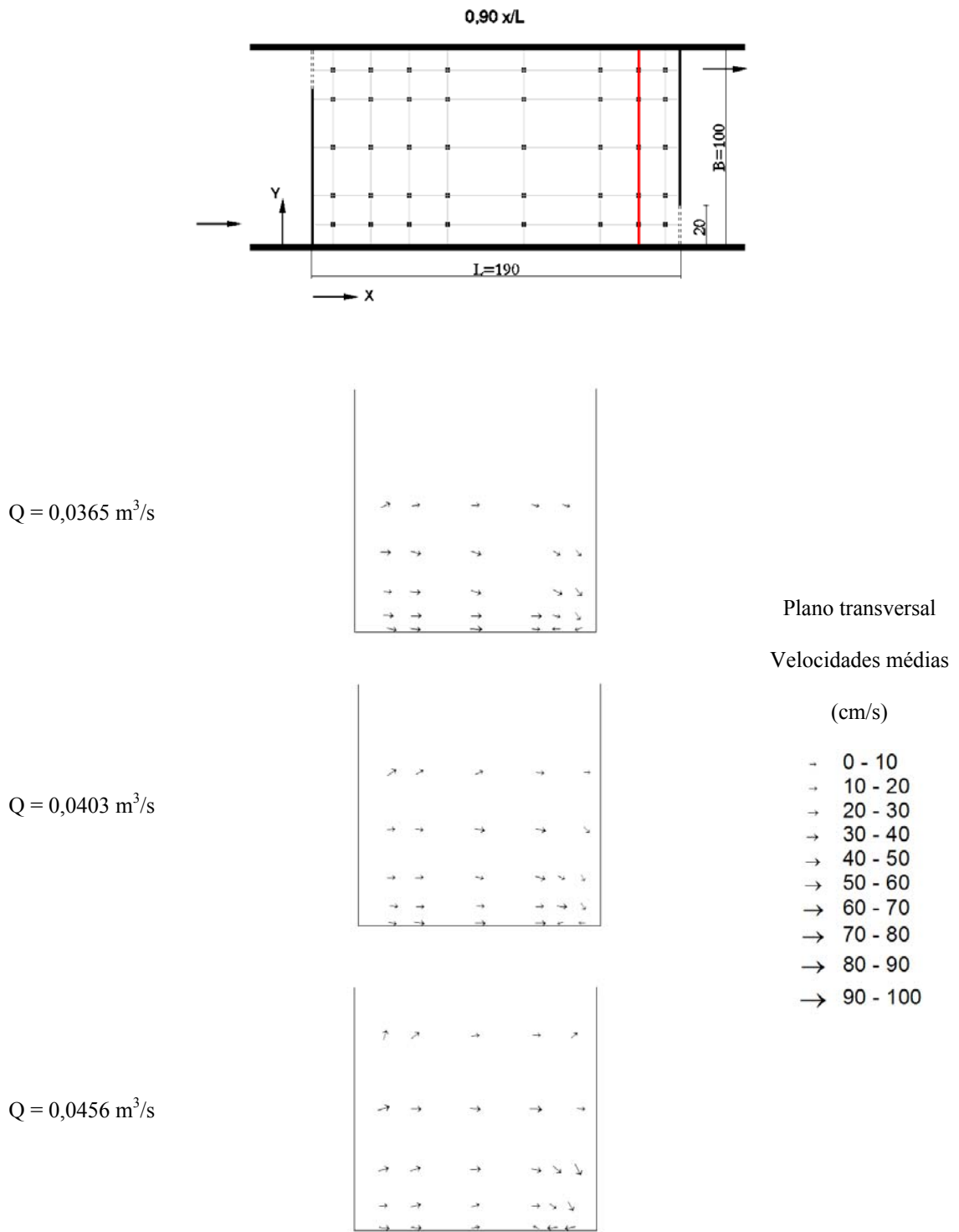


Figura 4.95 – Campo de velocidades em um plano transversal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($X=0,90 x/L$).

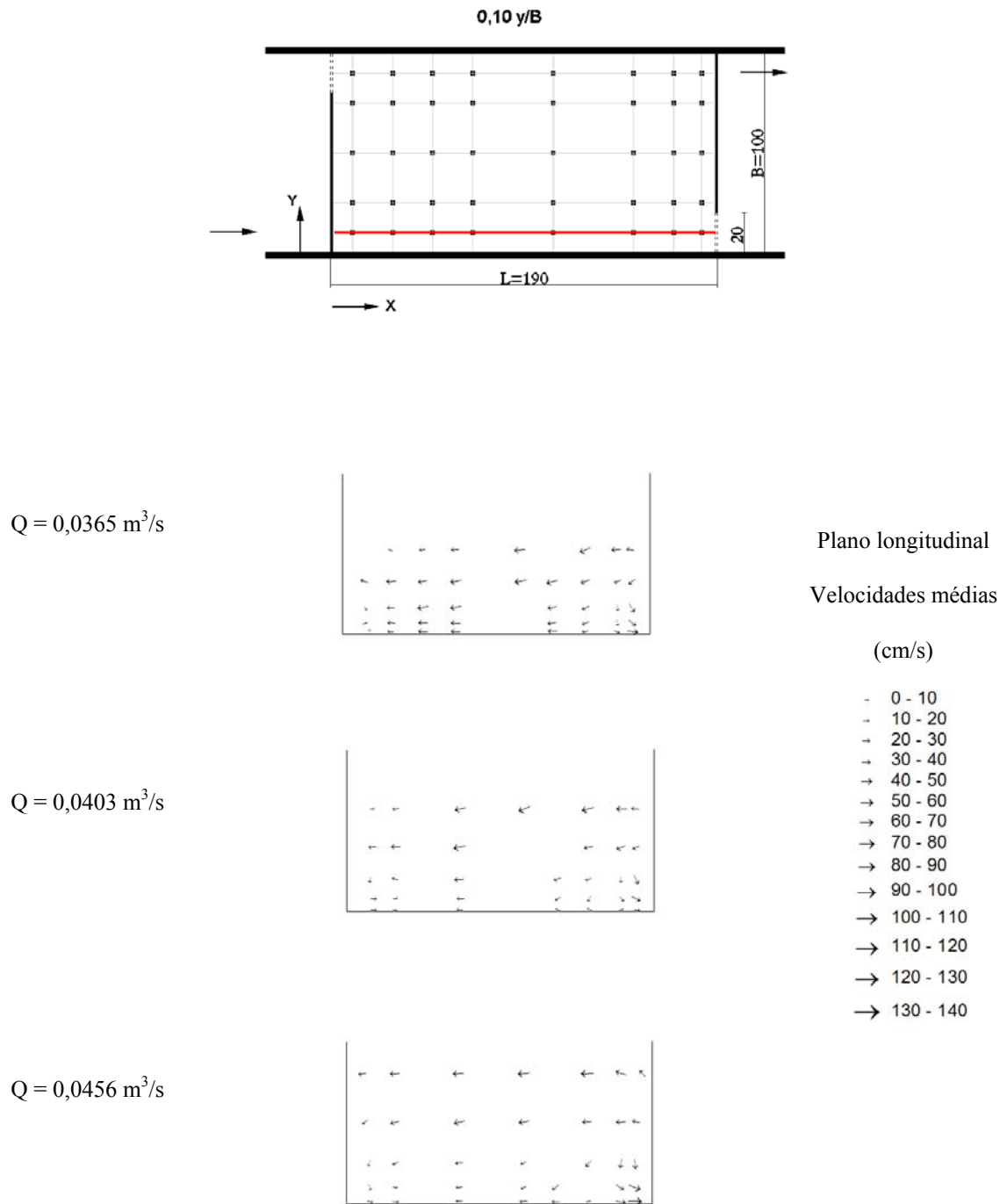


Figura 4.96 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,10 y/B$).

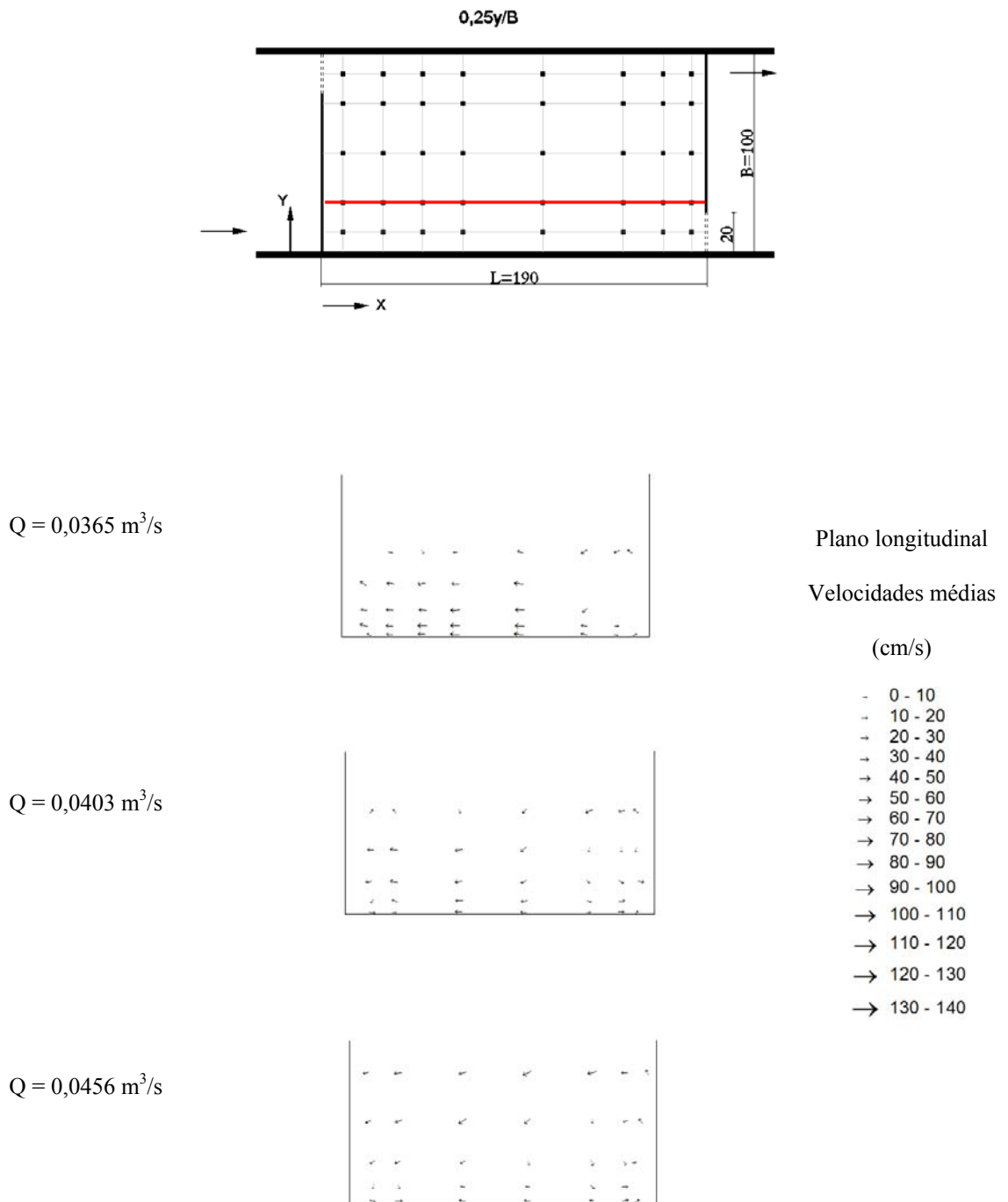


Figura 4.97 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,25 y/B$).

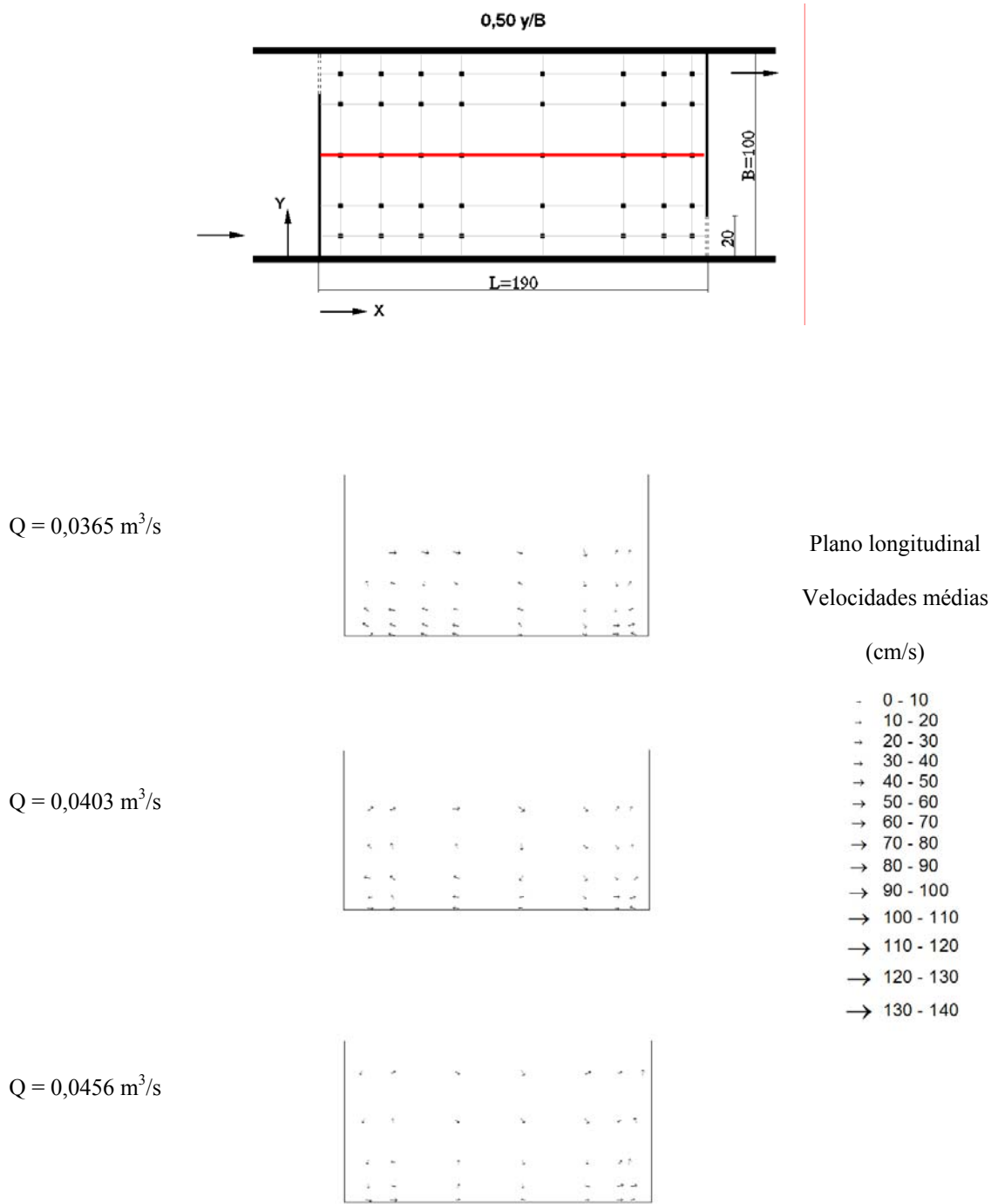


Figura 4.98 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,50 y/B$).

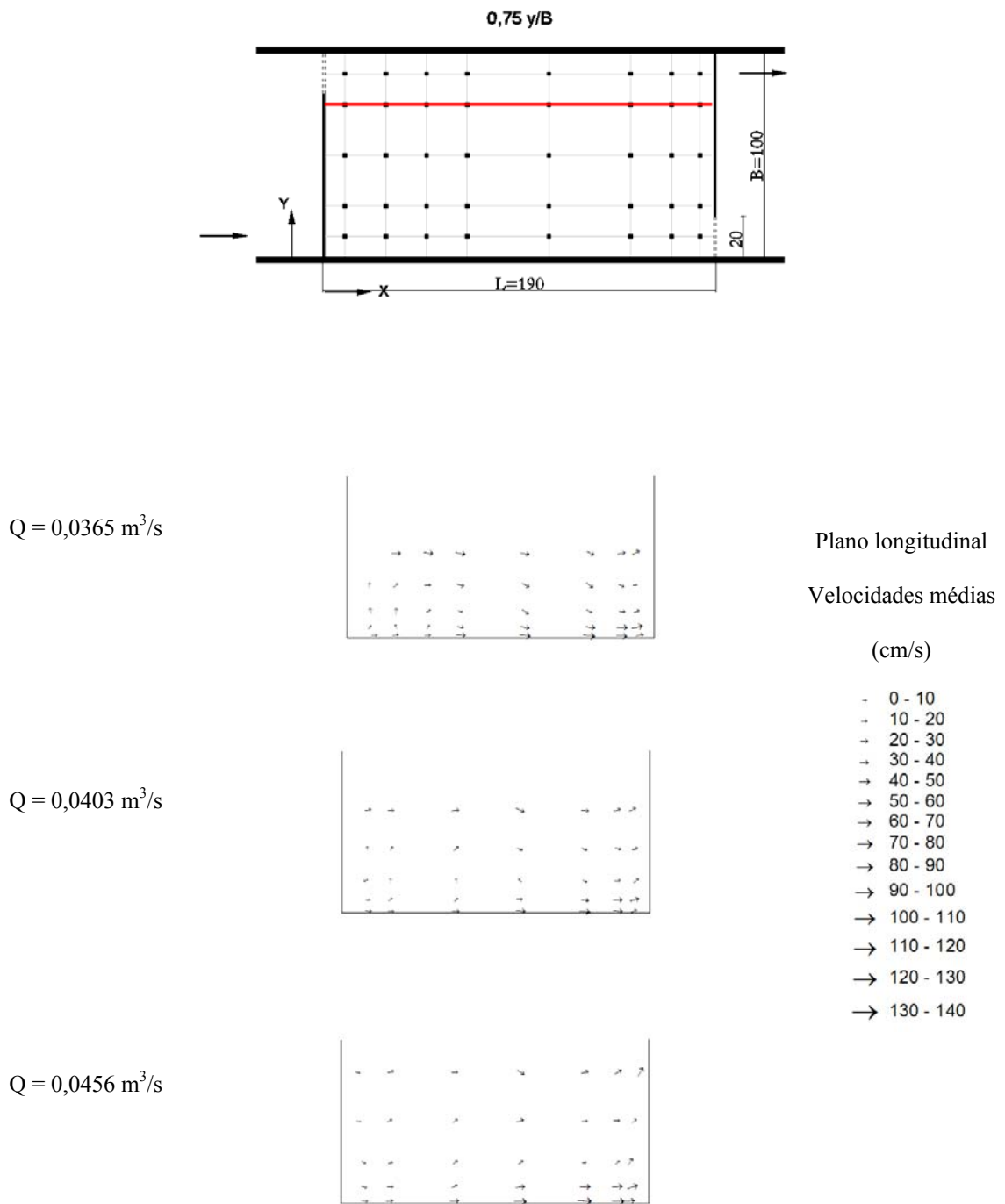


Figura 4.99 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,75 y/B$).

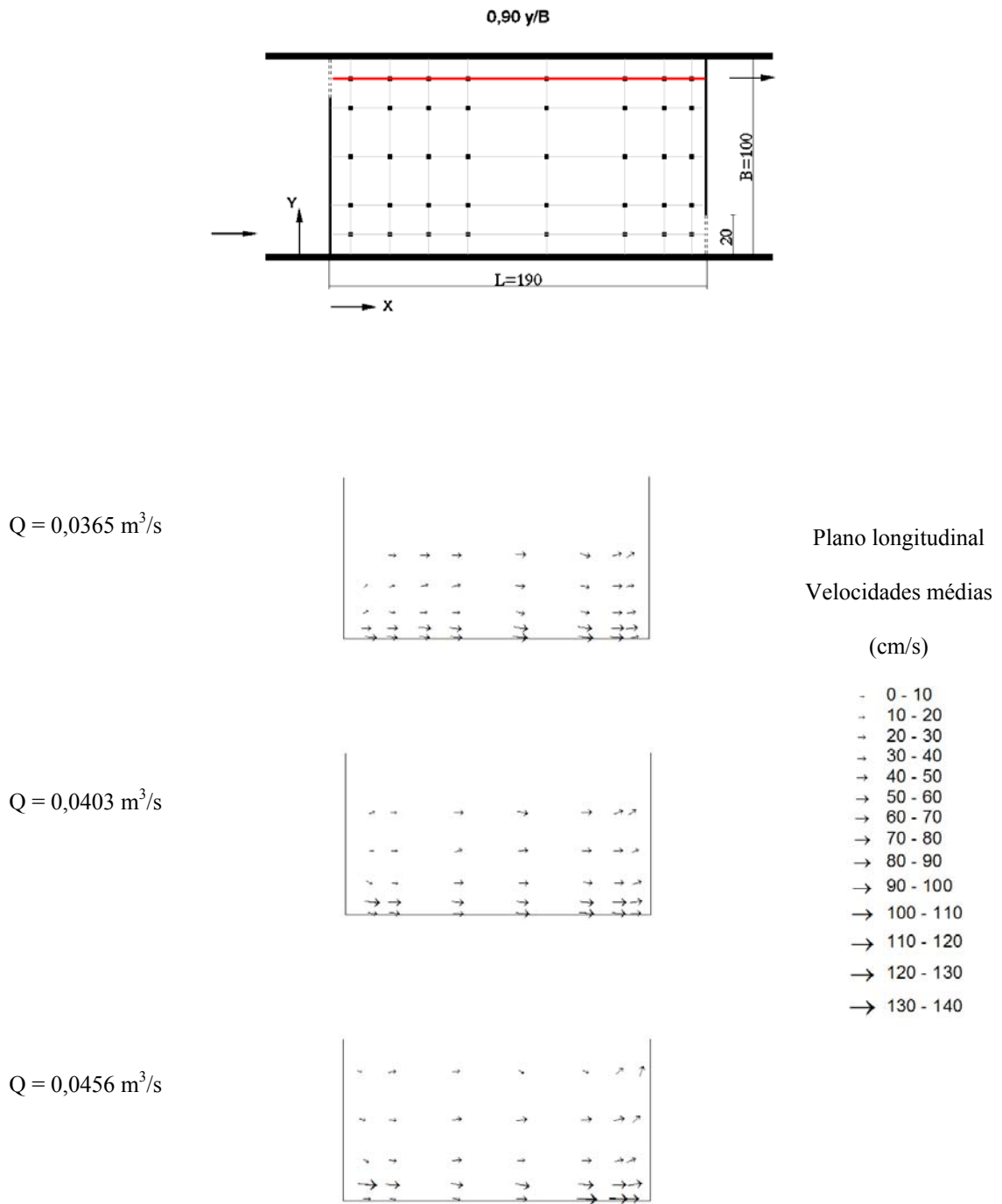


Figura 4.100 – Campo de velocidades em um plano longitudinal correspondente à posição mostrada no desenho acima ($Y=0,90 y/B$) para as vazões: (a) $0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$.

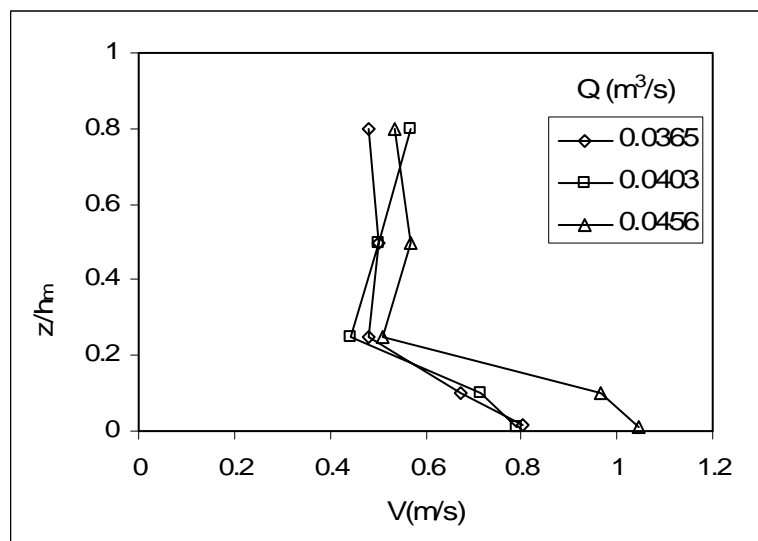


Figura 4.101 – Máximas velocidades médias medidas no tanque da passagem para peixes com orifício de fundo.

4.4.2.2 Características gerais do escoamento

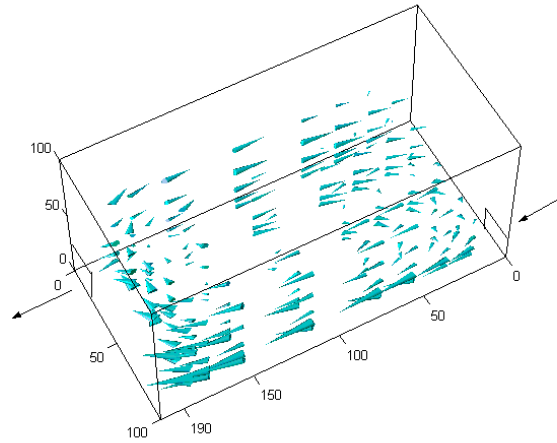
Na Figura 4.102 tem-se a representação tridimensional do comportamento dos vetores de velocidade dentro do tanque da passagem para peixes com orifícios de fundo, para as três vazões ensaiadas. Essas figuras apenas ilustram, de um modo geral, o que já foi detalhado através dos campos bidimensionais (paralelos ao fundo e verticais).

O escoamento nos tanques desse tipo de passagem para peixes pode ser caracterizado por um fluxo “principal”, com velocidades maiores, conectando orifícios consecutivos e uma grande recirculação de eixo vertical, que se forma ocupando todo o tanque. Esse fluxo principal ocorre na região que está sob influência direta da água que passa pelos orifícios, sendo que as maiores velocidades medidas ocorrem em profundidades compreendidas na altura dessas aberturas. Embora não tenha sido possível a medição das velocidades na seção do orifício, estas podem ser avaliadas teoricamente, conforme apresentado na Tabela 4.5. Na análise das máximas velocidades médias observou-se que o aumento da vazão gera o aumento das velocidades nas regiões do fluxo direto do orifício (mais próximo do fundo), não sendo alteradas para as demais profundidades.

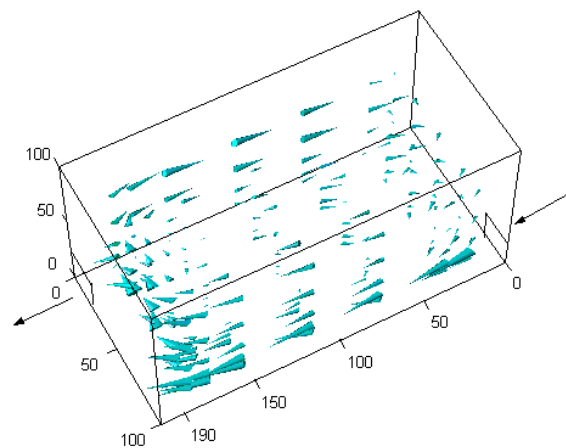
Além recirculação que ocupa todo o tanque, de características predominantemente horizontais, verifica-se, principalmente para as maiores vazões, fluxos ascensionais na entrada do tanque (orifício de entrada) e fluxos descensionais próximos ao orifício de saída.

Através da avaliação das velocidades médias do escoamento, pode-se inferir alguns possíveis efeitos nas espécies aquáticas. Primeiramente, como observado para as estruturas com descarregador de superfície, as espécies que utilizam esta estrutura com sucesso devem ter capacidade natatória para ultrapassar a velocidade potencial estimada do escoamento (dado

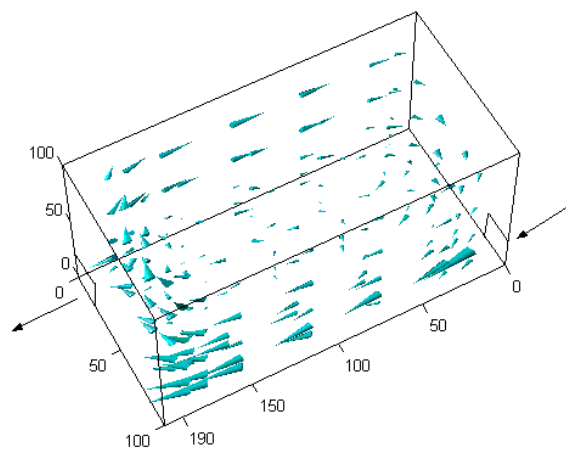
na Tabela 4.5). Dentro do tanque, as maiores velocidades médias medidas atingem valores levemente superiores a 50% da velocidade potencial, o que indica que depois de ultrapassados os pontos críticos (orifícios), os indivíduos provavelmente encontrarão características toleráveis de velocidades e amplas regiões de descanso.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.102 – Esquema do escoamento na escada para peixes com orifício de fundo: (a) $0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$.

O que deve ser mais bem avaliado, além de parâmetros da turbulência, que serão tratados em seguida, é se as correntes do tanque são suficientes para a orientação dos peixes no sentido do caminho a seguir. Esse tipo de informação deve ser obtida em laboratório, através de testes com as espécies de peixes de interesse, submetidos a diferentes condições de descarga, para que então essas informações sejam relacionadas com as características hidráulicas aqui detalhadas.

4.4.2.3 Campos de energia cinética média

A energia cinética média representa de outra maneira as componentes da velocidade média (Equação (4.3)). Na Figura 4.103, Figura 4.104 e Figura 4.105 são apresentados os campos de energia cinética média para as três vazões ensaiadas, para os cinco planos paralelos ao fundo. Comparando-se planos análogos para descargas diferentes, tem-se que o comportamento geral é semelhante para as diferentes vazões.

Nos planos distantes 1 cm do fundo e $10\%h_m$ verificam-se valores maiores de energia cinética média no caminho do fluxo principal. Para as duas maiores vazões (Figura 4.104 e Figura 4.105), nessas profundidades, tem-se que as demais regiões do tanque apresentam valores inferiores, enquanto para a menor vazão (Figura 4.103), observa-se a presença de valores um pouco maiores para a energia cinética média.

Para os demais planos paralelos ao fundo, observa-se que a distribuição dos campos de energia cinética média caracteriza-se, na maioria das situações, por valores baixos na parte central do tanque e valores mais elevados à medida que se aproxima das paredes, sendo que os valores mais elevados são inferiores aos observados nos planos mais próximos ao fundo.

A Figura 4.106 mostra os valores médios em cada plano da energia cinética média. Essa figura ilustra o que foi comentado anteriormente. Próximo ao fundo há valores maiores de energia cinética média sob influência direta do fluxo do orifício, diminui até o plano situado a $25\%h_m$ e volta a se elevar até o plano mais superficial. Não se observa uma relação desses valores associada às descargas.

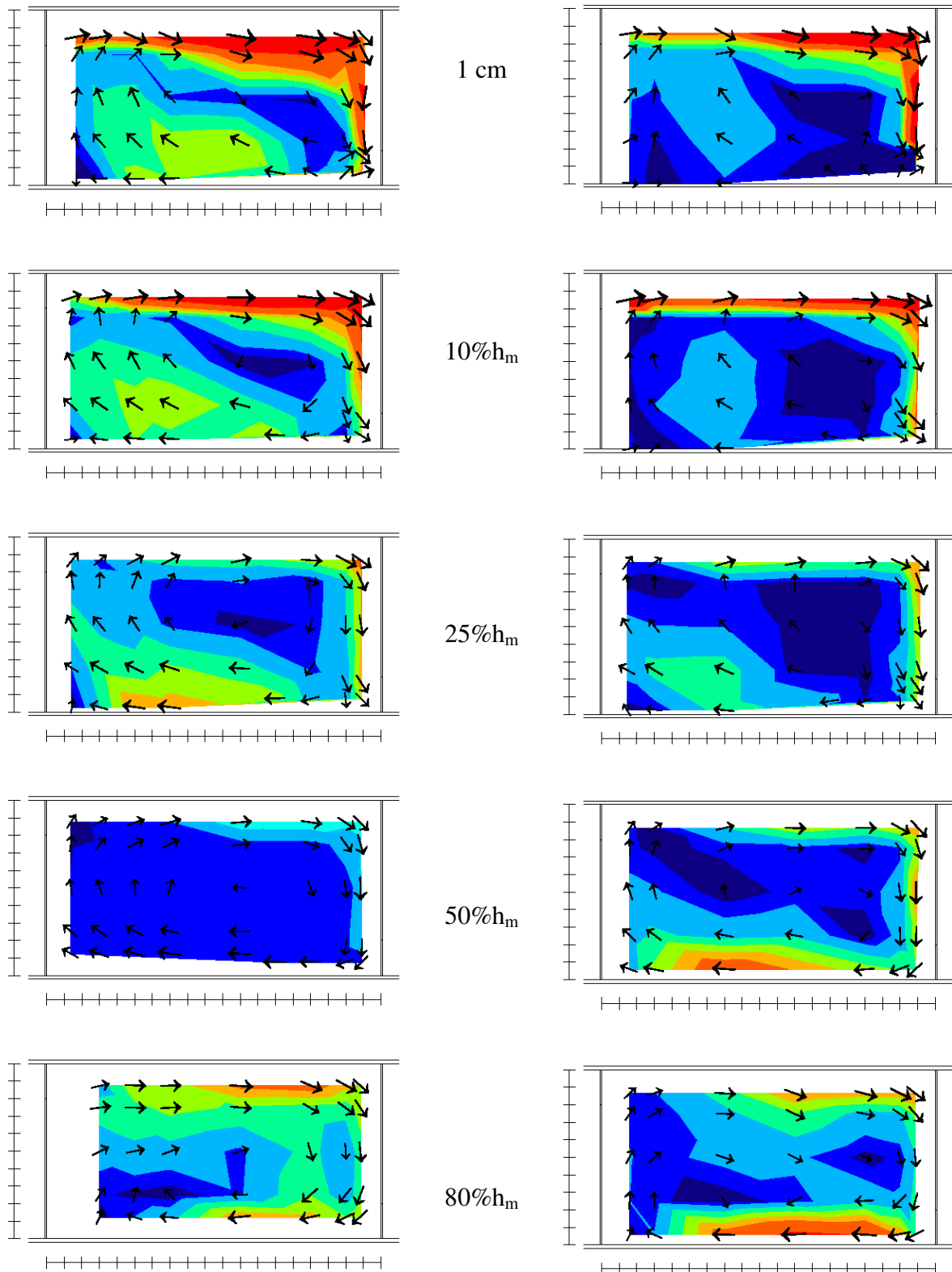


Figura 4.103 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.104 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

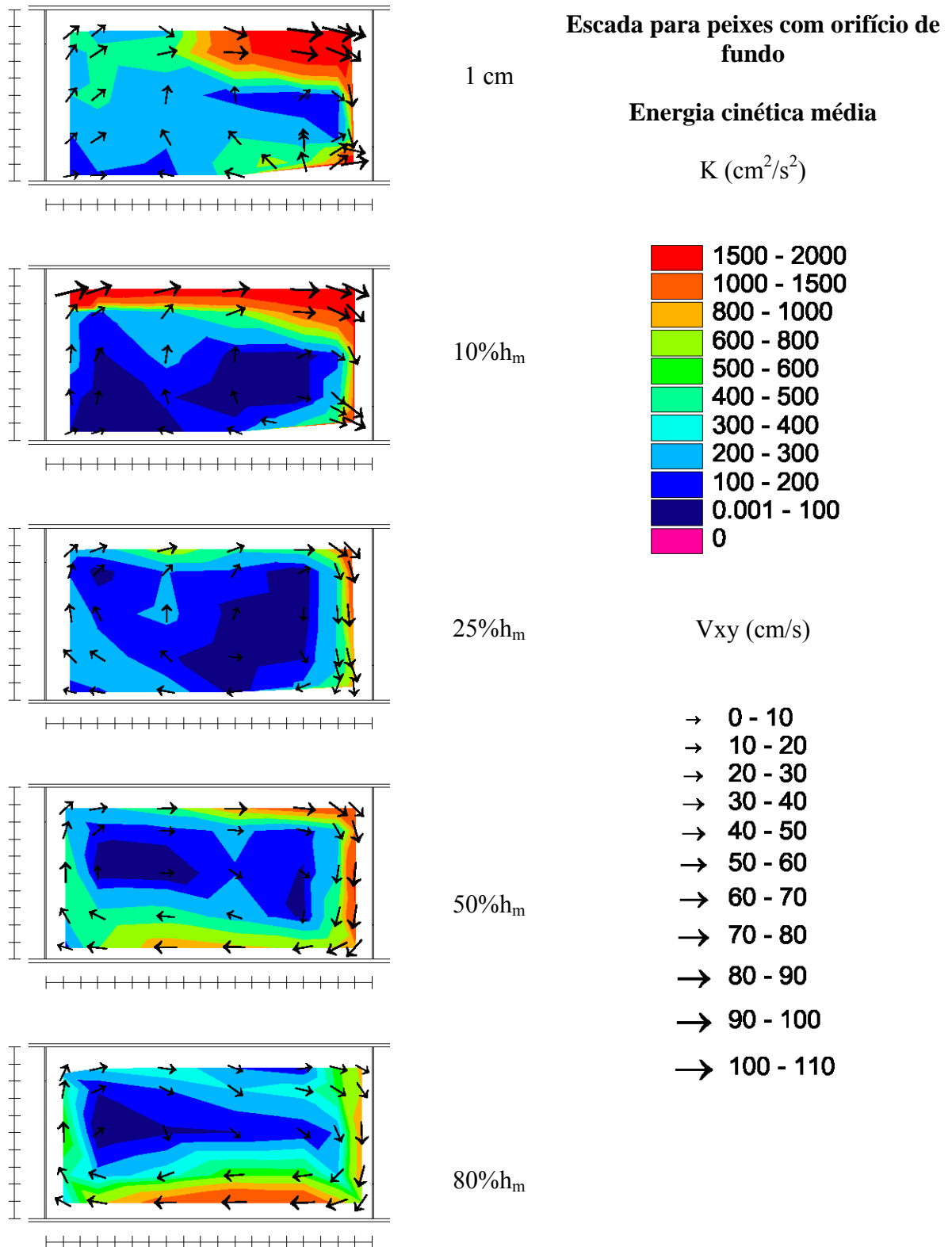


Figura 4.105 – Campo de energia cinética média para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

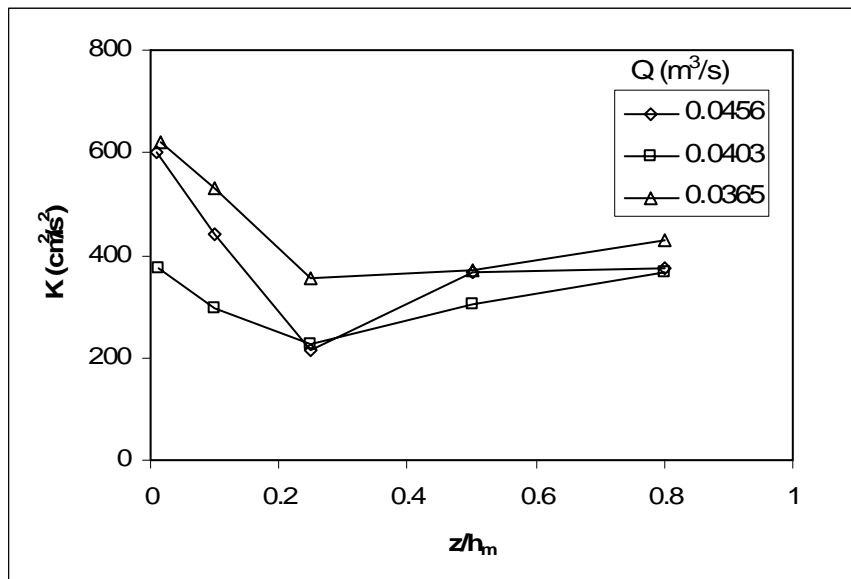


Figura 4.106 – Valores médios de energia cinética média para cada plano paralelo ao fundo no modelo com orifício de fundo.

4.4.2.4 Campos de energia cinética da turbulência

A energia cinética da turbulência avalia a turbulência do escoamento através das flutuações de velocidade (Equação (2.41)). Os campos de energia cinética da turbulência (Figura 4.107, Figura 4.108 e Figura 4.109), em comparação com os campos de energia cinética média, apresentam um comportamento mais definido nas três descargas. No Anexo 5 apresentam-se os campos de energia cinética da turbulência adimensionalizados em função da velocidade potencial ($k^{0,5}/V_p$).

Os maiores valores de energia cinética da turbulência encontram-se no caminho do escoamento principal, definido entre os orifícios consecutivos nos planos situados dentro da altura do orifício. Para as demais profundidades, os valores seguem a distribuição observada no plano próximo ao fundo. No entanto, os valores na região correspondente ao “fluxo principal” são menores, não ultrapassando $800\text{ cm}^2/s^2$, enquanto junto ao fundo, alcançam até $2000\text{ cm}^2/s^2$.

A distribuição dos valores de energia cinética da turbulência indica que, possivelmente, os peixes encontrarão maiores dificuldades de permanência na região do “fluxo principal”, onde os valores são bastante elevados. No entanto, a maior parte do tanque apresenta valores baixos desse parâmetro, que representam zonas de descanso para os indivíduos.

A Figura 4.110 mostra os valores médios de energia cinética da turbulência em cada plano. Observa-se que para os planos situados a 25% h_m , 50% h_m e 80% h_m , o valor médio é um pouco inferior a $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, sendo praticamente constante, independente da vazão e da profundidade. Para o plano próximo ao fundo (1 cm), têm-se os maiores valores e observa-se que estes são maiores para as maiores descargas. Para o plano situado a 10% h_m , têm-se valores um pouco inferiores aos do fundo, e também se pode perceber a relação da energia cinética da turbulência com a vazão.

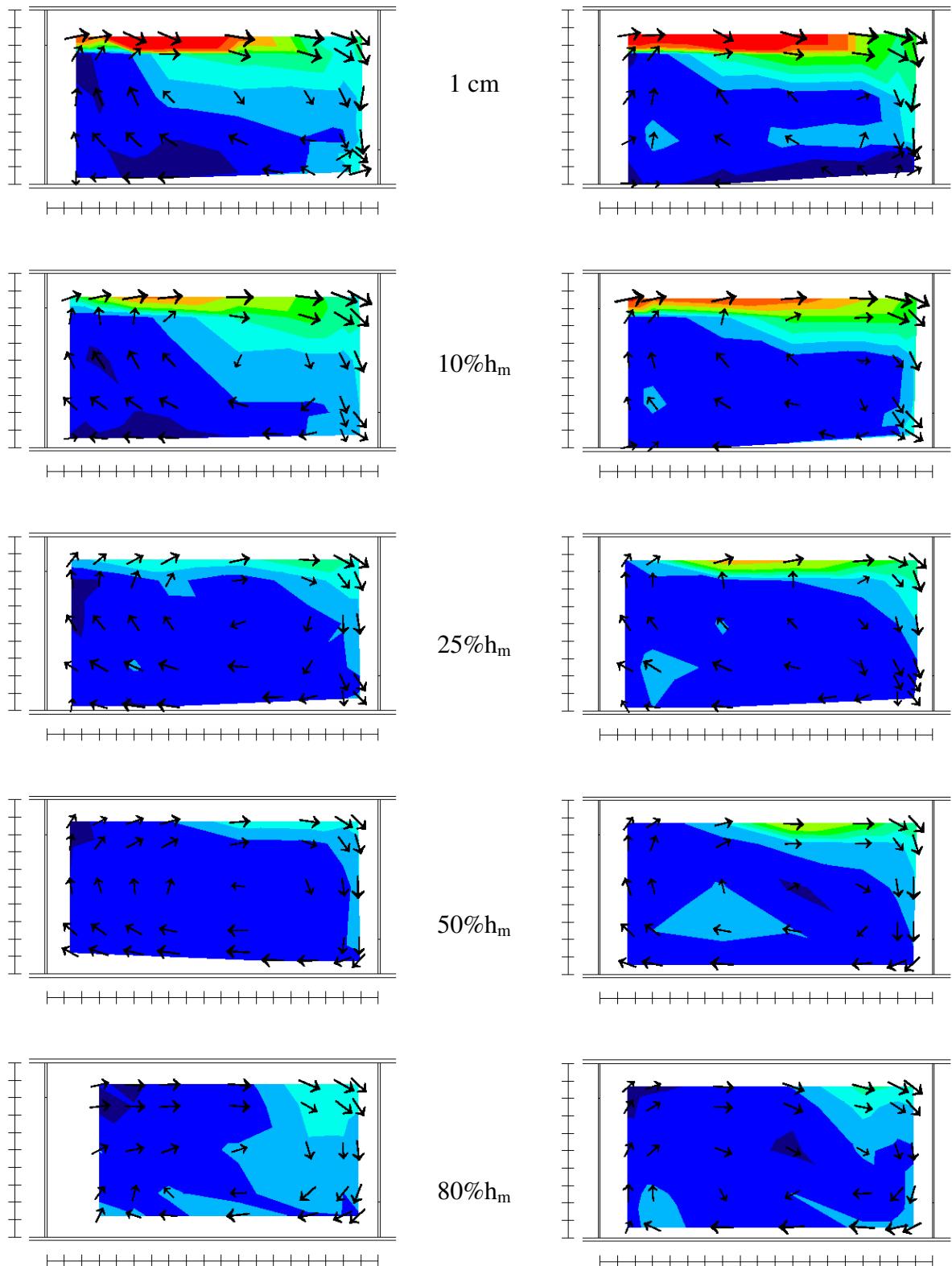


Figura 4.107 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

Figura 4.108 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

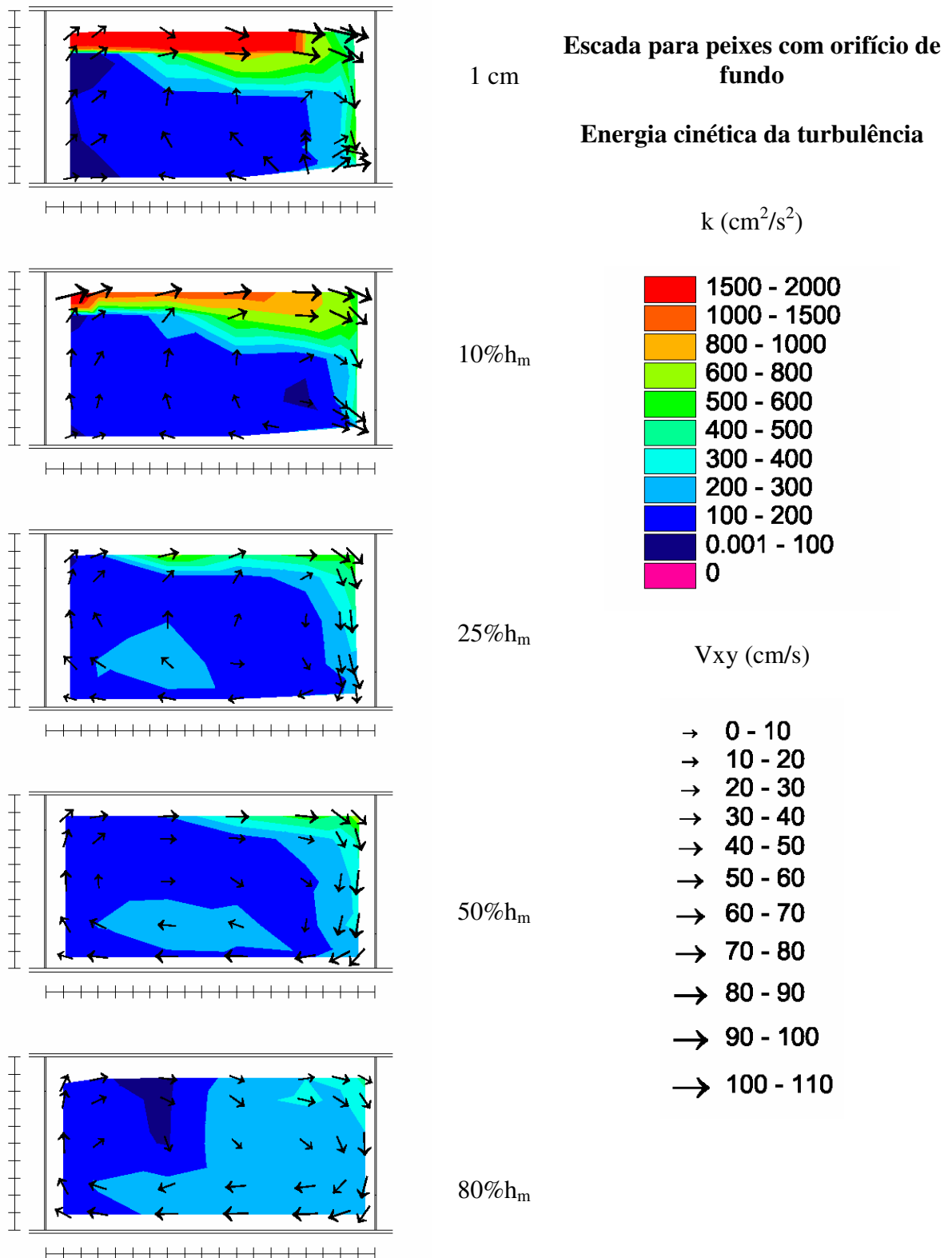


Figura 4.109 – Campo de energia cinética da turbulência para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

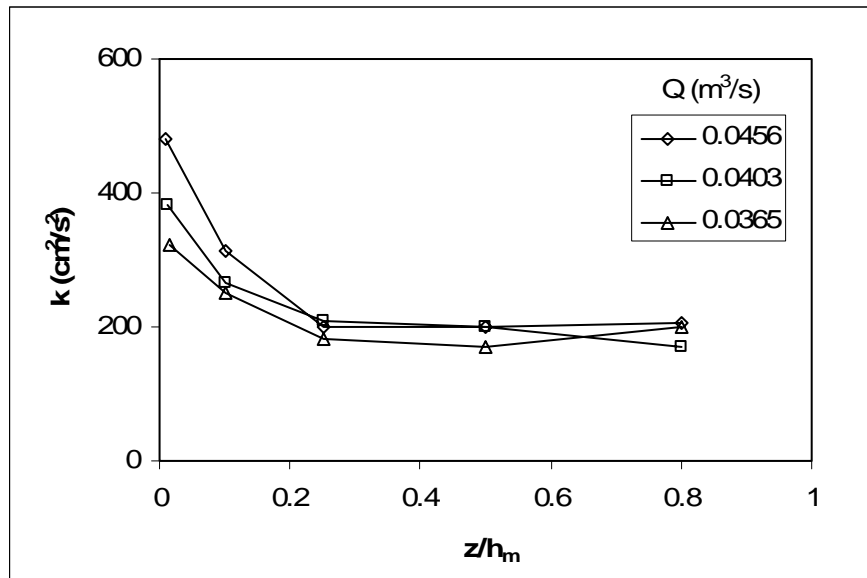


Figura 4.110 – Valores médios da energia cinética da turbulência para cada plano paralelo ao fundo no modelo da escada para peixes com orifícios de fundo.

4.4.2.5 Campos de intensidades da turbulência

As intensidades da turbulência expressam a flutuação das velocidades em função dos valores médios. Avaliando a Figura 4.111, a Figura 4.112 e a Figura 4.113, verifica-se o mesmo tipo de comportamento observado nas escadas para peixes do tipo ranhura vertical e com descarregadores de superfície. As regiões de maiores velocidades apresentam intensidades da turbulência menores. Essas regiões correspondem, nesta estrutura, às zonas mais próximas às paredes do tanque. Nas regiões de menores velocidades, na parte central do tanque, os valores da intensidade da turbulência são maiores.

A Figura 4.114 apresenta os valores médios de intensidade da turbulência em cada plano. Observa-se que os valores ficam entre 0,8 e 1,6, mas não se visualiza um comportamento correlacionado com a profundidade ou com a descarga.

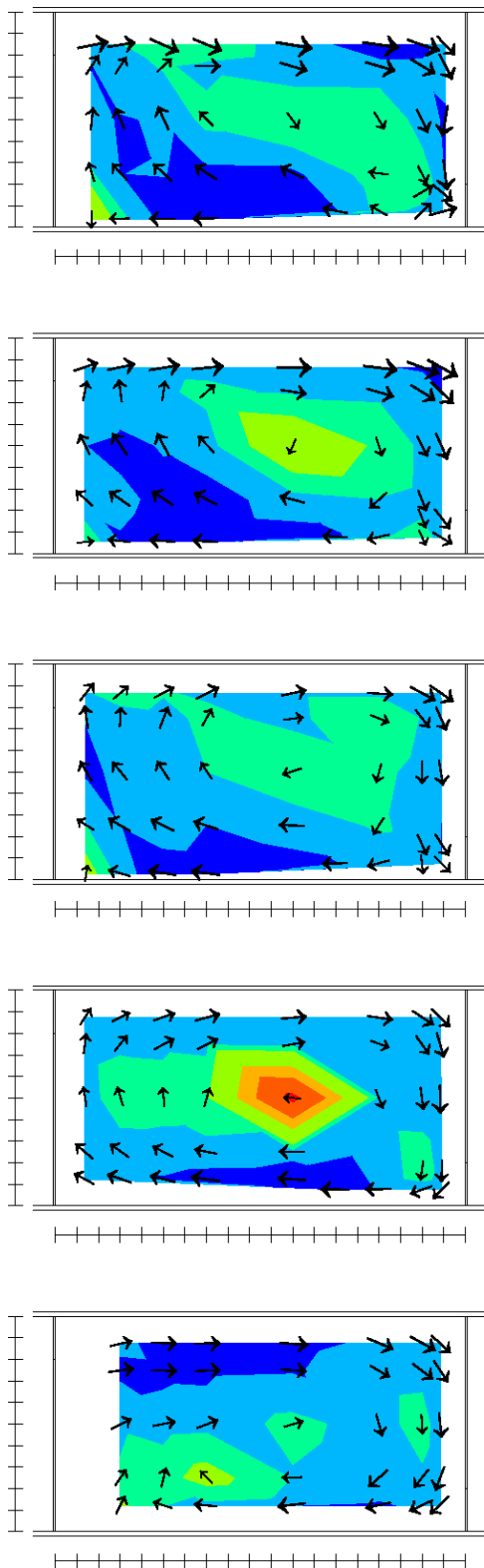


Figura 4.111 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

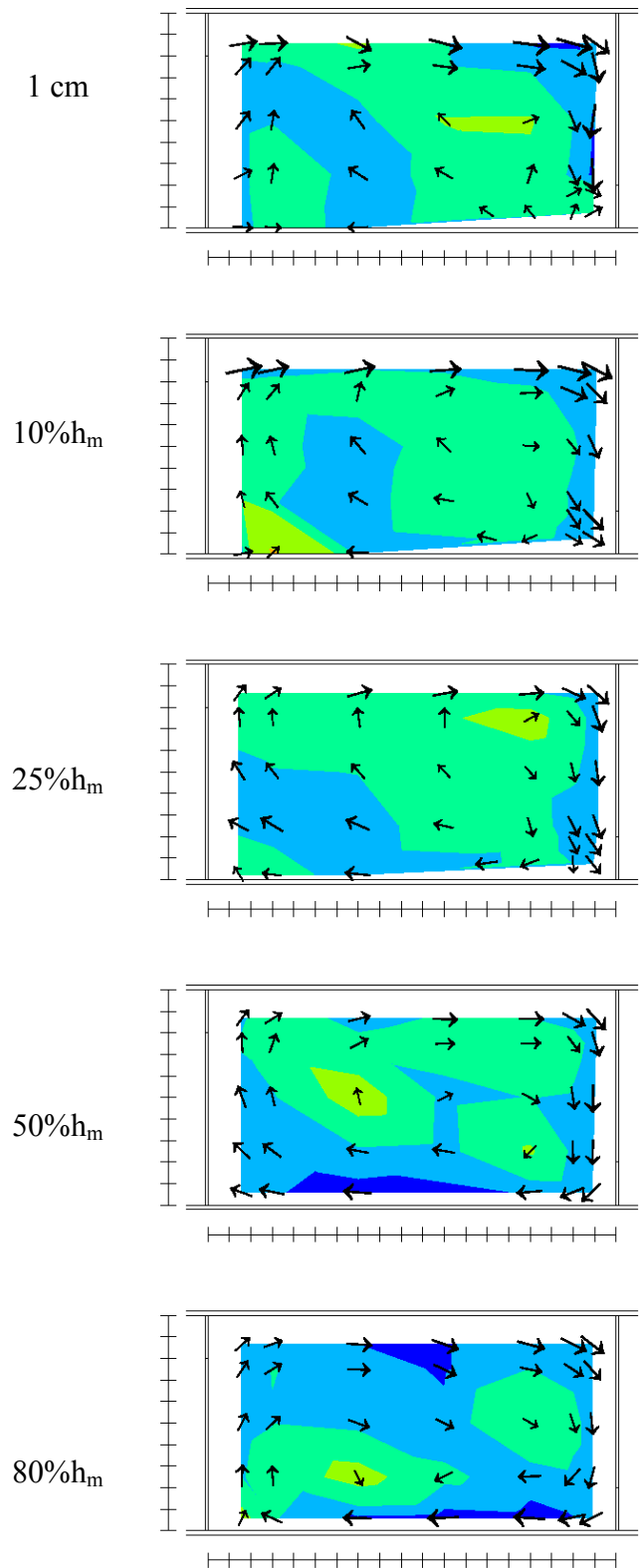


Figura 4.112 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

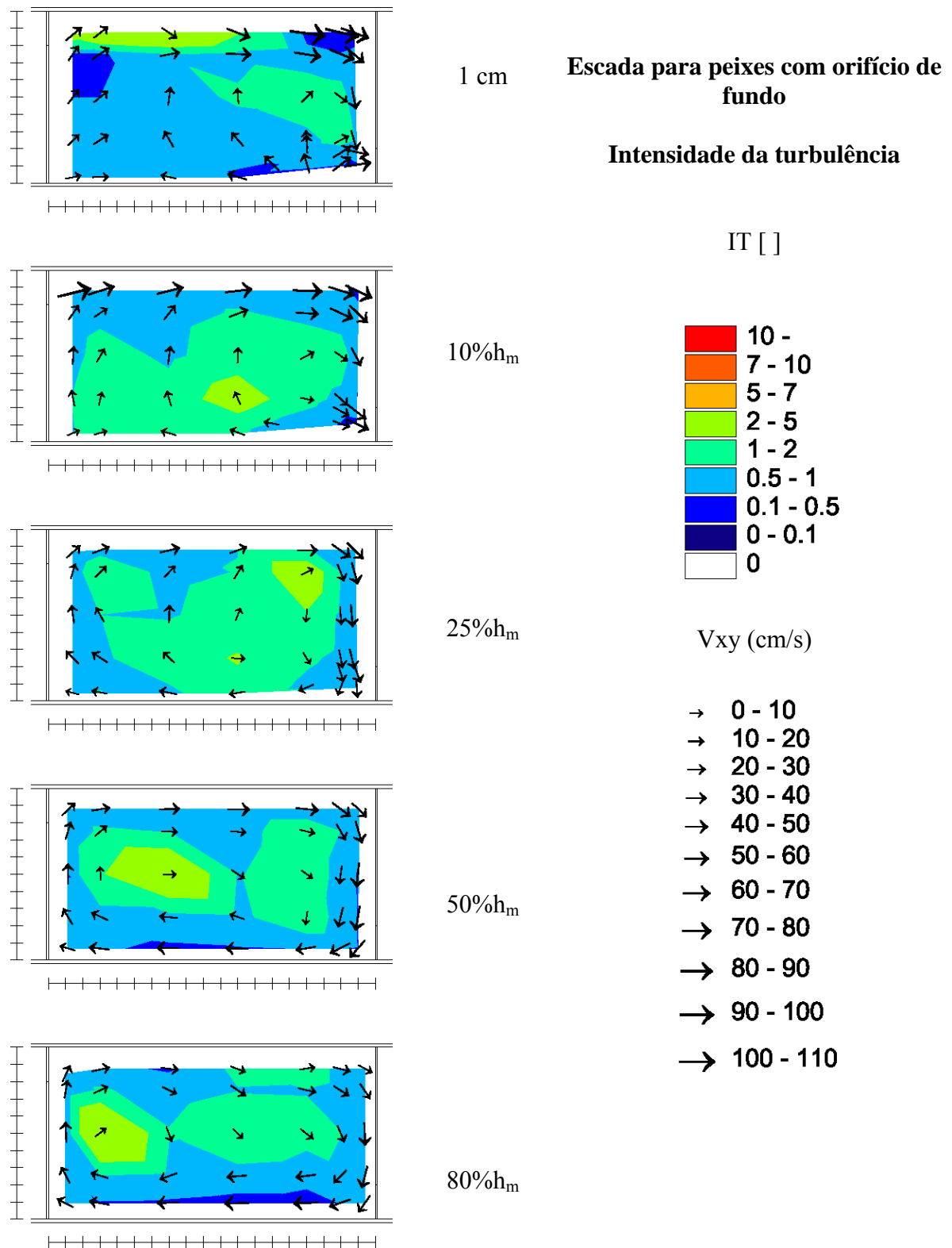


Figura 4.113 – Campo de intensidade da turbulência para $Q=0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

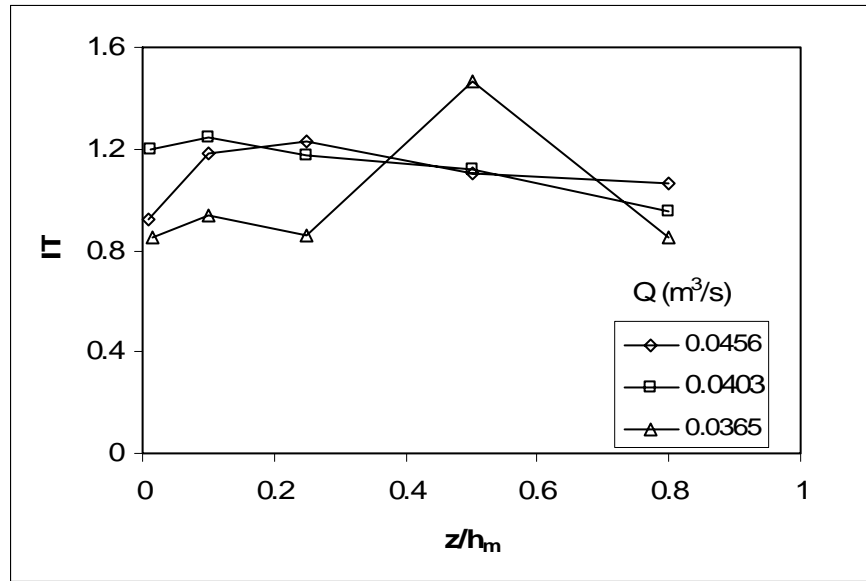


Figura 4.114 – Valores médios de intensidade da turbulência para cada plano paralelo ao fundo no modelo com orifício de fundo.

4.4.2.6 Campos de tensões de Reynolds

A observação dos campos de tensões de Reynolds no plano xy, para a passagem para peixes com orifícios de fundo, ilustra um comportamento já esperado. Como comentado ao longo do texto e mais detalhado no Anexo 2, a avaliação de certos parâmetros da turbulência, a partir de medições realizadas com o ADV, pode ser limitada. Observa-se na Figura 4.115, Figura 4.116 e Figura 4.117, que para os planos correspondentes às profundidades $25\%h_m$, $50\%h_m$ e $80\%h_m$, tem-se um mesmo comportamento, independente da vazão, com valores baixos, com a maioria das áreas entre -5 e 5 N/m^2 . Esses resultados refletem as regiões do tanque onde as velocidades são baixas (como avaliado no item 4.4.2.1), com flutuações também moderadas.

Para os planos que recebem diretamente o fluxo proveniente do orifício (distantes 1 cm e $10\%h_m$ do fundo) não se pode definir um padrão de comportamento das tensões de Reynolds independente das vazões. Pode-se verificar que na região da entrada da água no tanque, em frente ao orifício, ocorrem os maiores valores em módulo de tensões de Reynolds. No entanto, em alguns casos aparecem tensões apenas negativas (maior descarga) e, para as outras duas descargas ocorrem valores positivos e negativos. Uma característica que se observa para as três vazões é a ocorrência de uma região de valores positivos junto à zona de aproximação do orifício, para os dois planos que ficam compreendidos na altura do orifício.

Os valores de tensões de Reynolds no plano xy na estrutura com orifícios de fundo ficam entre -30 e 30 N/m².

A Figura 4.118 apresenta os valores médios em cada plano para as tensões de Reynolds no plano xy. Observa-se que para o plano distante 1 cm do fundo, os valores entre as três descargas estão bastante dispersos. Para as demais profundidades, os valores médios para as diferentes vazões seguem uma tendência, indicando que se pode utilizar os campos de tensões de Reynolds para estimar a distribuição desses valores para uma determinada profundidade.

Como comentado anteriormente, alguns autores consideram as tensões de Reynolds como um valioso indicativo para relacionar a turbulência com o comportamento biológico. Sob esse aspecto, verifica-se que as espécies apresentarão maiores dificuldades junto ao orifício e na parede junto ao fluxo principal proveniente deste. De certa maneira, podia-se intuitivamente prever esta distribuição de valores. Faz-se necessário avaliar a capacidade natatória das espécies e a tolerância à turbulência do escoamento, para que se possa associar essas informações com os valores obtidos aqui, característicos desse modelo de escada para peixes.

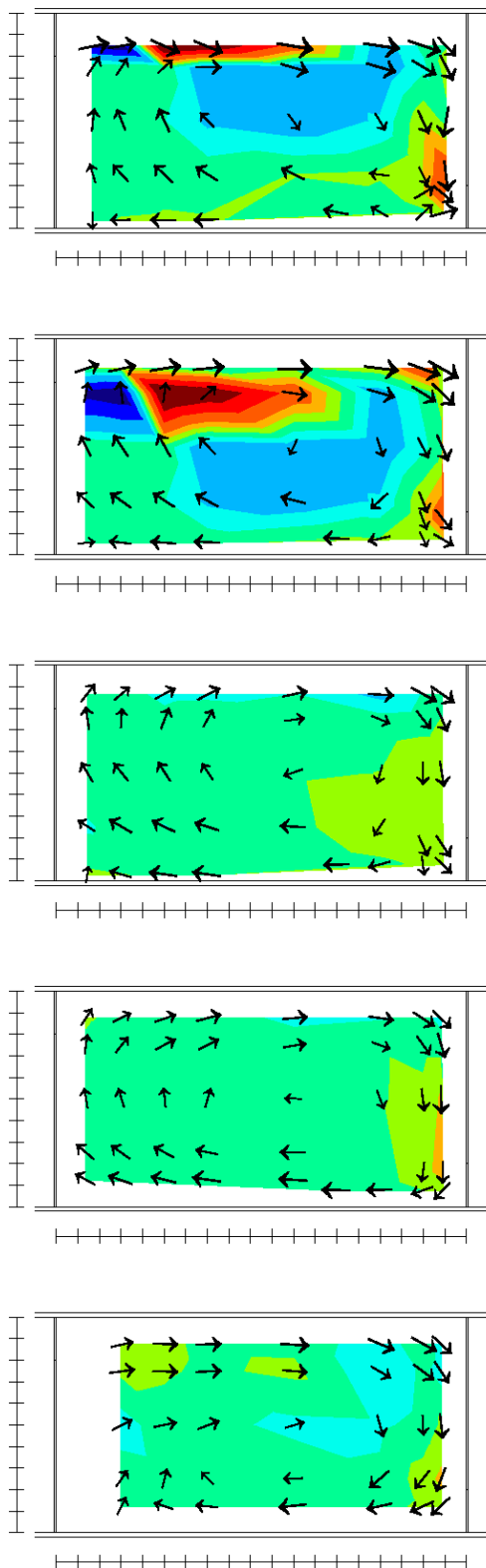


Figura 4.115 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

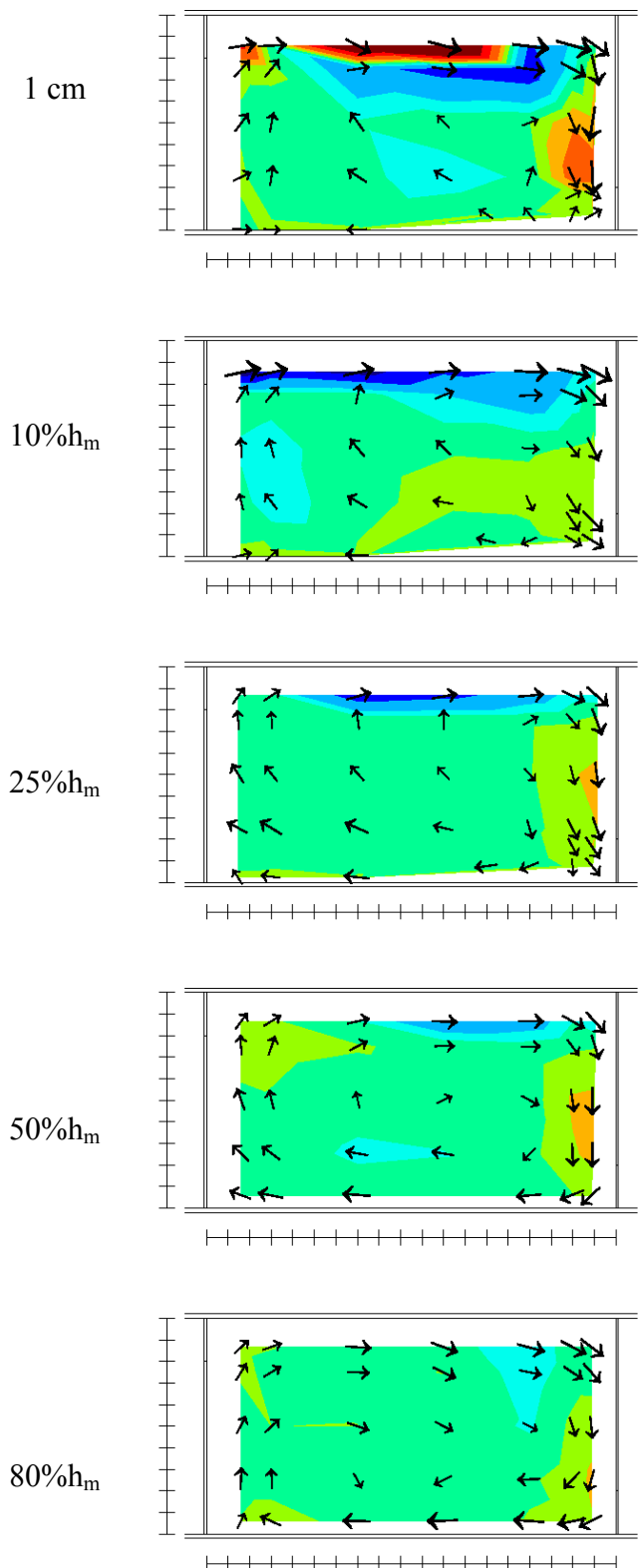


Figura 4.116 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal). (legenda na página seguinte)

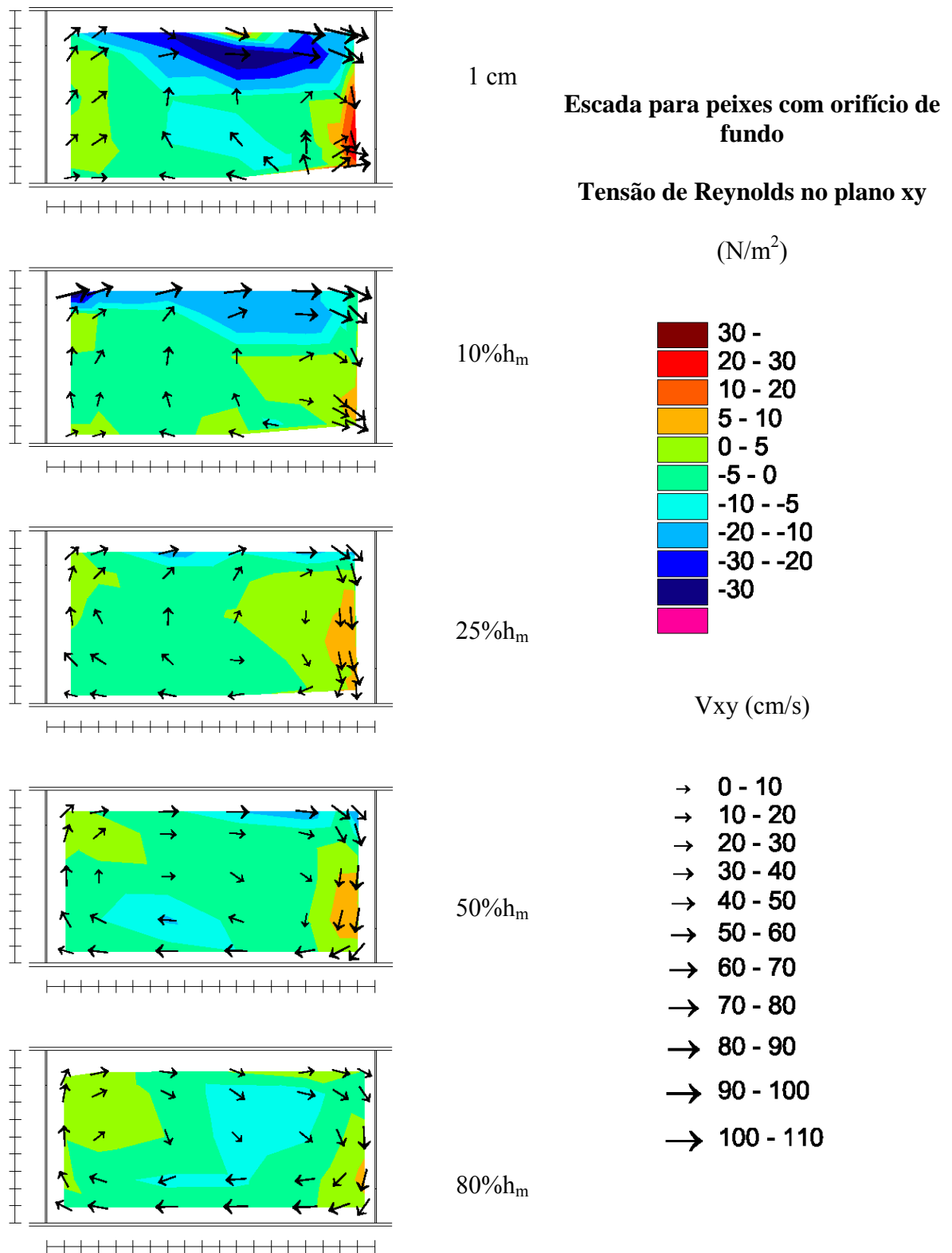


Figura 4.117 – Campo de tensões de Reynolds no plano xy para $Q=0,0456 m^3/s$, para o modelo com orifício de fundo, em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

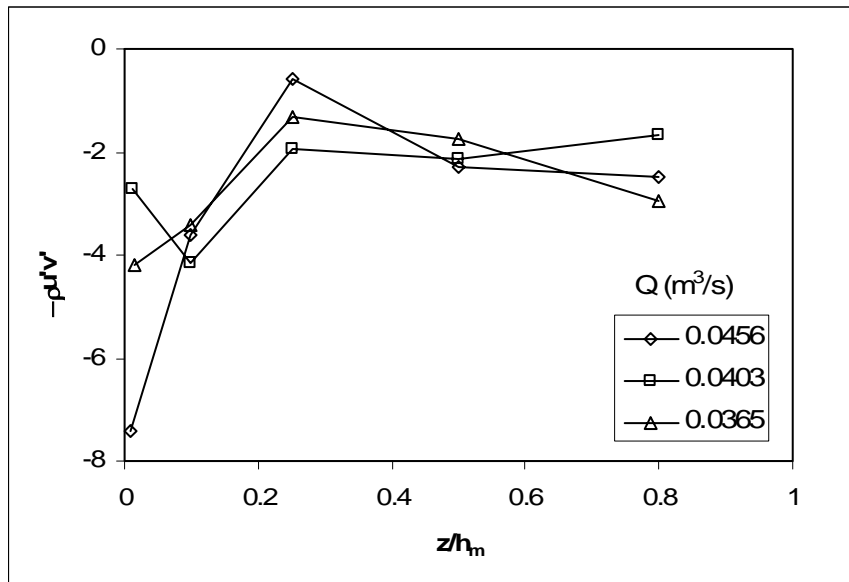


Figura 4.118 – Valores médios das tensões de Reynolds (N/m^2) no plano xy para cada plano paralelo ao fundo no modelo com orifício de fundo.

CAPÍTULO 5

5 Conclusões

Neste trabalho avaliaram-se algumas características hidráulicas de três mecanismos de transposição de peixes do tipo passagem para peixes ou escada para peixes. Adicionalmente, procurou-se verificar a interação de parâmetros biológicos com a estrutura do escoamento, com o objetivo de encontrar indicadores que possam ser utilizados para caracterizar o “sucesso” de uma determinada estrutura. A avaliação das características da turbulência do escoamento, em conjunto com a avaliação qualitativa do comportamento de peixes nas estruturas avaliadas, indicam uma possível correlação entre eles.

A seguir comenta-se, em linhas gerais, os principais pontos verificados neste contexto e já detalhados no Capítulo 4. Da mesma maneira que foi tratado ao longo do texto, as principais conclusões de cada estrutura serão apresentadas separadamente.

Algumas conclusões a respeito da utilização de velocimetria Doppler na avaliação de parâmetros de turbulência do escoamento são apresentados no Anexo 2.

5.1 Estrutura A – MTP de Ranhura Vertical

Parâmetros Hidráulicos

A avaliação dos parâmetros hidráulicos do escoamento: coeficiente de descarga, vazão adimensional e coeficiente de cisalhamento, demonstraram que o escoamento nessa estrutura apresenta o comportamento semelhante ao relatado na bibliografia consultada, embora considerando geometrias com algumas variações. Esse fato reforça a ocorrência das condições de contorno do escoamento definido como “uniforme” durante os ensaios.

Superfície Livre e Pressões junto ao fundo

Os mapas de níveis de água da **superfície livre** do escoamento mostram um comportamento semelhante para as diferentes descargas, caracterizado pela maior profundidade do escoamento na parte de montante do septo maior, e a montante da ranhura, na região de aproximação da mesma. Ao passar pela ranhura, observa-se a diminuição da superfície d’água de forma acentuada. Os mapas de **pressão média** junto ao fundo mostram um comportamento semelhante ao observado na superfície livre do escoamento, como se esperava. Avaliando as **flutuações de pressão**, verificou-se que na região do jato os valores

de desvio padrão são maiores que os presentes nas regiões de recirculação. Analisando os campos dos coeficientes de assimetria e curtose, tem-se que é no jato principal que os valores se afastam mais do comportamento característico de uma distribuição normal.

Padrão Geral do escoamento

A análise das velocidades médias do escoamento na escada com ranhura vertical indicou o comportamento geral do escoamento de acordo com o encontrado em estudos anteriores: tem-se um jato principal conectando ranhuras consecutivas, onde as velocidades são as mais elevadas dentro dos tanques, com componentes predominantemente horizontais; adjacente ao jato principal existem duas zonas de recirculação do escoamento, uma de cada lado, onde as velocidades são menores.

A avaliação segundo planos verticais mostrou a presença de correntes de recirculação secundárias de eixo horizontal transversal (na parte central da grande recirculação de eixo vertical) com velocidades de menor magnitude, com deslocamento do fluxo no sentido de ascensão junto ao defletor de jusante do tanque de controle, e de descida, junto ao tanque de montante.

No entanto, ressalta-se que o comportamento predominante pode ser representado pelos campos horizontais de velocidade. As velocidades médias medidas no plano xy chegam a valores da ordem de 1,00 m/s, enquanto as componentes verticais variam entre -0,30 m/s e +0,20 m/s.

Com a adimensionalização dos campos com componentes de velocidade paralelos ao fundo, observa-se que a escada para peixes com ranhura vertical apresenta na maior parte do tanque valores de velocidades inferiores à velocidade potencial. Nas regiões de recirculação do escoamento, a velocidade não ultrapassa 40% da velocidade potencial ao mesmo tempo em que, na zona do jato principal observam-se valores entre 60 e 100%, sendo na maior parte entre 60 e 80% daquele valor.

Os campos de velocidades nos planos paralelos à soleira indicam não existirem variações significativas do comportamento do escoamento ao longo da profundidade. Ao serem comparadas as magnitudes dos vetores de velocidade das três descargas testadas, observam-se valores independentes da vazão.

Turbulência

A avaliação dos campos de parâmetros relacionados à turbulência do escoamento na escada com ranhura vertical, representa muito bem a separação de duas zonas: a região do jato principal e as duas regiões de recirculação.

A **energia cinética média** representa, de outra maneira, as velocidades médias do escoamento, refletindo o comportamento dos campos de velocidade. Os valores de energia cinética média no modelo da escada para peixes com ranhura vertical chegam até $1500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$.

A **energia cinética da turbulência** nos tanques pode ser caracterizada por valores de até $1000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ na região do jato principal, e nas regiões de recirculação, por valores que variam entre 100 e $400 \text{ cm}^2/\text{s}^2$.

A **intensidade da turbulência** representa as flutuações de velocidade (dadas pelo desvio padrão da série observada) em relação ao valor médio temporal. Assim, observaram-se os menores valores da intensidade da turbulência nas regiões das velocidades de maior magnitude (região do jato principal) e maiores valores de intensidade da turbulência nas regiões de recirculação do escoamento, como também verificado por Pena (2004). Como representa uma flutuação relativa à velocidade média em cada ponto, acredita-se que não seja um bom indicativo para representar a turbulência, principalmente em um estudo onde existem componentes biológicas envolvidas. Isso porque, ao se analisar um determinado valor isolado de intensidade da turbulência, não se têm as grandezas reais do valor médio e da flutuação, mas apenas da relação entre ambas.

O comportamento do campo de **tensões de Reynolds** no plano xy mostra, como observado para a energia cinética da turbulência, valores mais elevados na passagem pela ranhura e ao longo do jato principal. Adjacente a esses valores mais elevados, tem-se uma região pequena de transição, com valores menores, e logo uma outra região de grandes magnitudes de tensões de Reynolds, no entanto, de sentido contrário. Na região da grande recirculação, a maior parte da área apresenta valores entre $(-5 \text{ N}/\text{m}^2)$ e zero, confirmando que na região da grande recirculação têm-se as melhores condições para o descanso dos peixes. As maiores magnitudes das tensões de Reynolds observadas chegam a $30 \text{ N}/\text{m}^2$, ocorrendo em pequenas regiões. No caminho do jato principal, grande parte do mesmo apresenta valores entre 5 e $20 \text{ N}/\text{m}^2$.

Interação Peixe-Escoamento

A comparação da caracterização do escoamento com o comportamento dos peixes indica que a trajetória preferencial do mesmo, no caminho dentro do tanque, coincide com condições favoráveis sob o ponto de vista hidráulico. Observou-se, no estudo de Viana (2005) e em uma avaliação qualitativa realizada neste trabalho, que os peixes preferem se deslocar adjacentes ao jato principal, do lado da recirculação maior, onde existem menores valores de tensões de Reynolds e de energia cinética da turbulência. Na passagem pela ranhura, o mesmo prefere a aproximação junto ao defletor maior, onde foram observadas menores velocidades.

Os menores valores de velocidade provavelmente são influenciados pela forma do defletor maior, que direciona o jato para o lado do defletor menor, onde as velocidades são maiores.

Além do exposto, considerando o monitoramento que vem sendo realizado junto a UHE Igarapava na escada para peixes, pode-se associar às espécies catalogadas tolerância aos valores de velocidades médias e indicadores da turbulência apresentados aqui, considerando as devidas leis de similitude. É possível, então, inferir que geometrias diferentes, mas com escoamento dentro dos limites de velocidades e tensões de Reynolds (ou energia cinética da turbulência) encontrados nesta estrutura, teriam o mesmo sucesso na transposição dessas espécies.

5.2 Estrutura B1 – MTP com Descarregador de Superfície

Padrão Geral do Escoamento

A avaliação das velocidades médias do escoamento na escada para peixes do tipo descarregador de superfície indica não ocorrerem grandes variações do comportamento geral para as descargas avaliadas.

Nessa estrutura, verificam-se maiores velocidades nas regiões mais próximas à superfície, principalmente na região da entrada do jato no tanque através do descarregador. O fluxo superficial de maiores velocidades chega ao defletor de jusante, onde muda de direção, sendo que parte segue no mesmo plano horizontal, junto ao septo, e a outra parte encaminha-se para o fundo do tanque. Em todos os planos observa-se a existência de uma grande recirculação no sentido do descarregador de montante para o descarregador de jusante.

Na maior parte do tanque os valores de velocidades são bastante inferiores à velocidade potencial. Para os planos distantes 1 cm, 10% h_m , 25% h_m e 50% h_m do fundo, verifica-se que as componentes de velocidade não ultrapassam 40% da velocidade potencial. No plano mais próximo da superfície (80% h_m), na região da entrada do jato no tanque, observam-se velocidades de até 70% V_p , inferiores aos máximos valores medidos sobre o descarregador. As componentes verticais de velocidade variam entre -0,30 m/s e 0,20 m/s.

Turbulência

A avaliação dos parâmetros de turbulência indica que para as três descargas ensaiadas, os resultados levam a um comportamento padrão.

O estudo dos campos de **energia cinética da turbulência** mostra que, na maior parte das áreas, os valores são inferiores a 200 cm^2/s^2 , com exceções na região da entrada da água no tanque e no caminho junto à parede, onde atingem até 2000 cm^2/s^2 .

Quanto aos campos de tensões de Reynolds, tem-se na maior parte do tanque os valores entre -5 e 5 N/m². Na região em frente ao descarregador de superfície, no caminho do escoamento do jato mergulhante, os valores chegam a 30 N/m². Na posição mais próxima do descarregador, antes do local do mergulho do jato no tanque, os valores da tensão de Reynolds também são elevados. Observa-se que o aumento da vazão resulta no aumento da região com valores de tensões de Reynolds negativas, junto à aproximação do descarregador de jusante e na região junto ao descarregador de montante.

A avaliação da energia cinética média e das intensidades de turbulência não agrega informações significativas, pelo menos a partir do que foi avaliado até o momento..

Interação Peixe-Escoamento

O comportamento da relação V/V_p no tanque mostra que, provavelmente, as espécies com menor capacidade natatória, que necessitam utilizar a velocidade de explosão para nadar através do fluxo sobre o descarregador, encontram neste tipo de estrutura grandes regiões de descanso. Verificou-se, pela avaliação qualitativa do comportamento dos peixes, que os menores valores de energia cinética da turbulência e tensões de Reynolds próximos a zero, nas regiões junto ao defletor, abaixo do descarregador, favorecem a aproximação dos indivíduos, que encontrariam grandes dificuldades em passar pelo jato proveniente do descarregador, com características desfavoráveis: velocidade elevada e presença de bolhas de ar no escoamento.

Um ponto que deve ser avaliado nestas estruturas é, obviamente, a capacidade dos peixes de realizarem a passagem pelo descarregador, e se o fluxo dentro dos tanques apresenta condições suficientes para orientar os indivíduos durante a transposição.

5.3 Estrutura B2– MTP com Orifício de Fundo

Padrão Geral do Escoamento

O escoamento nos tanques desse tipo de passagem para peixes pode ser caracterizado por um fluxo “principal”, com velocidades maiores, conectando orifícios consecutivos e uma grande recirculação de eixo vertical, que se forma ocupando todo o tanque. Esse fluxo principal ocorre na região que está sob influência direta da água que passa pelo orifício, sendo que as maiores velocidades medidas ocorrem em profundidades compreendidas na altura do orifício.

À medida que o escoamento se afasta da zona sob influência do escoamento entre os orifícios, observa-se que a recirculação se mantém, porém com componentes de velocidade

inferiores, com relações V/V_p inferiores a 30%, enquanto nos planos mais próximos ao fundo, atingem até 50%.

Observam-se componentes verticais de velocidade com valores entre -0,30 m/s e 0,20 m/s, não se identificando um padrão geral para o comportamento.

Turbulência

A energia cinética da turbulência e as tensões de Reynolds apresentam maiores magnitudes no caminho do escoamento principal entre orifícios consecutivos, da mesma maneira como observado nas outras duas configurações estudadas.

Os valores de **energia cinética da turbulência** chegam a alcançar até $2000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ junto ao fundo, verificando-se maiores valores para as maiores descargas, enquanto na região central do tanque, o valor médio é um pouco inferior a $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, sendo praticamente constante, independente da vazão e da profundidade.

Na região da entrada da água no tanque, em frente ao orifício, ocorrem os maiores valores em módulo de **tensões de Reynolds**, no entanto, não se verificou um padrão independente da descarga. Possivelmente esse fato resulta das limitações de medições com o ADV em posições próximas a fronteiras sólidas. Para as profundidades fora da linha de ação do orifício, tem-se um mesmo comportamento, independente da vazão, com valores baixos de tensões de Reynolds, com a maioria das regiões com valores entre -5 e 5 N/m^2 . Considerando que em todo o tanque, têm-se valores entre -30 e 30 N/m^2 .

A avaliação da energia cinética média e das intensidades de turbulência não agregam informações novas.

Interação Peixe-Escoamento

As características da escada com orifício de fundo obviamente favorecem as espécies com hábitos de nado junto ao fundo. A avaliação realizada neste trabalho indica que as espécies que conseguirem passar pelos orifícios não terão dificuldades dentro dos tanques em relação a valores muito elevados de velocidade. No entanto, é necessário avaliar as condições de atração nessas configurações, já que se observaram regiões bastante calmas dentro do tanque, com regiões localizadas de velocidades maiores.

5.4. Estudo Comparativo entre os MTP Testados

As principais variáveis consideradas no dimensionamento de passagens para peixes por bacias sucessivas são: declividade do canal, distanciamento entre defletores, tipo de passagem entre tanques consecutivos, dimensões das aberturas (orifícios, descarregadores e/ou ranhuras), volume dos tanques, variações de níveis de montante e jusante, descargas,

entre outros. Dos itens citados, a princípio todos influenciam as características do escoamento na estrutura, que é o tópico principal deste trabalho. Por isso, pelo número de variáveis envolvidas, a comparação do funcionamento dos três tipos de passagens para peixes avaliadas é complexa.

As configurações geométricas B1 e B2 testadas na estrutura B, que pode ser considerada como um protótipo, mantiveram constantes a declividade do canal e as dimensões do tanque, alterando apenas o modo de passagem do escoamento entre os tanques. Neste caso, a comparação entre essas duas estruturas pode ser mais simples, com o objetivo de indicar as vantagens de utilização de uma das duas escadas para peixes, de acordo com as espécies de peixe alvo do local de implantação da estrutura.

Quando a análise de comparação engloba, além da estrutura B, a estrutura A, verifica-se que o número de variáveis é maior, dificultando o processo.

Como este trabalho envolveu três tipos diferentes de passagens para peixes por bacias/tanques sucessivos, um item importante a ser considerado no momento da comparação e utilização dos resultados apresentados neste trabalho é a correta transposição dos resultados para estruturas de escalas diferentes das aqui apresentadas. Conforme comentado anteriormente, para escoamentos com superfície livre, os modelos com similitude de Froude são os mais adequados.

A seguir, traçam-se alguns comentários comparativos em relação a alguns itens abordados nesta pesquisa.

Considerações sobre o Padrão Geral do Escoamento

A análise do comportamento geral do escoamento dentro dos tanques das três escadas para peixes demonstra que, embora as configurações geométricas sejam diferentes, alguns pontos em comum podem ser traçados.

Nas três escadas para peixes: com ranhura vertical, com descarregador de superfície e com orifício de fundo, verifica-se que há um fluxo “principal” conectando o escoamento entre aberturas (ranhura, descarregador ou orifício), onde as velocidades são maiores e há formação de zonas de recirculação com menores velocidades.

Na escada para peixes de ranhura vertical, observa-se que como a ranhura estende-se ao longo de toda a profundidade do escoamento, as características do escoamento são predominantemente horizontais, sem alterações significativas para diferentes planos paralelos ao fundo. Esse fato permite que as espécies tenham a liberdade para escolher a profundidade de nado de sua preferência. Deve-se, no entanto, verificar se as máximas velocidades

presentes em cada estrutura estão dentro dos limites da capacidade natatória das espécies que utilizarão estes mecanismos de transposição.

A escada para peixes do tipo descarregador de superfície apresenta pontos críticos nas passagens pelos descarregadores. Há duas possibilidades para o peixe ultrapassar o obstáculo: nadando ou saltando. Este tipo de estrutura é seletiva, sendo que peixes “de fundo” serão desfavorecidos, já que terão que utilizar habilidades diferentes das suas aptidões naturais para realizar a transposição. Um ponto que deve ser avaliado relaciona-se com a verificação das correntes dentro do tanque, no sentido de serem suficientes na orientação dos peixes quanto ao caminho a seguir.

A escada para peixes com orifício de fundo também é seletiva, com características que se adaptam melhor a peixes que preferem nadar próximo ao fundo, por motivos óbvios, relacionados à geometria do modelo. Verificou-se que para esse tipo de escada para peixes têm-se as menores velocidades relativas (V/V_p), na maior parte do tanque, o que representa melhores condições de descanso para os peixes. As velocidades relativas do “fluxo principal” são inferiores às observadas nos outros dois modelos de escadas para peixes. Isso significa que os indivíduos estarão sujeitos às máximas velocidades por um período menor em relação às outras duas estruturas, o que resulta menor gasto de energia. Por outro lado, sabe-se que este tipo de configuração geométrica apresenta problemas relacionados à sua manutenção, sendo que os orifícios podem ser facilmente obstruídos na falta de limpeza adequada.

Sob o ponto de vista da alimentação de água exigida pelos diferentes sistemas, têm-se, considerando as estruturas avaliadas neste trabalho, mantendo as proporções dos tanques e aberturas, maiores gastos de água para as escadas do tipo ranhura vertical, seguida da dotada com orifício, sendo a equipada com descarregador de superfície a mais econômica. Ressalta-se que os aspectos biológicos são preponderantes a este critério, no entanto, durante a fase de escolha de uma escada para peixes, este item pode ser considerado no processo de estudo de alternativas, desde que sejam atendidas as exigências biológicas.

Considerações sobre as Características da Turbulência

Observa-se, de uma forma geral, que a escada com ranhura vertical apresenta comportamentos semelhantes de campos de parâmetros da turbulência (energia cinética da turbulência e tensões de Reynolds) em diferentes planos paralelos ao fundo. Esse fato resulta do escoamento passar por uma abertura que compreende toda a profundidade do escoamento, o que não provoca fortes correntes verticais. Já nos outros dois modelos, cuja passagem da água entre tanques consecutivos ocorre por uma abertura parcial em relação à profundidade do escoamento (orifício ou descarregador), observam-se comportamentos diferenciados ao

longo dos planos paralelos ao fundo. Verifica-se que nas regiões de influência direta do escoamento que passa pelo orifício ou descarregador, os valores de parâmetros turbulentos, tais como, energia cinética da turbulência e tensões de Reynolds, são mais elevados e, no restante do tanque, os valores são bastante inferiores.

Para possibilitar a comparação quantitativa dos resultados obtidos nos três modelos, optou-se por representar os campos de energia cinética da turbulência adimensionalizados ($k^{0,5}/V_p$). Os mapas da energia cinética da turbulência adimensionalizada estão representados no Anexo 5. Os valores máximos da energia cinética adimensionalizada ocorrem na região do fluxo principal de cada uma das estruturas: na escada com ranhura vertical, ocorrem ao longo de toda a profundidade, e nas outras duas estruturas, encontram-se nas regiões afetadas diretamente pelas aberturas (descarregador ou orifício). Nas regiões de recirculação onde as velocidades são menores, os valores de ($k^{0,5}/V_p$) são bastante inferiores em relação aos valores encontrados no fluxo principal. Observa-se, através desses mapas, que o modelo de ranhura vertical apresenta valores máximos da relação ($k^{0,5}/V_p$) na ordem de 0,4, o que também é verificado no modelo com descarregadores e no modelo com orifícios. No entanto, nas escadas para peixes com descarregadores ou com orifícios, a região de recirculação do escoamento apresenta valores de ($k^{0,5}/V_p$) entre 0 e 0,1, enquanto no modelo com ranhura vertical, nas regiões de recirculação, estes valores ficam entre 0,1 e 0,2. Isso indica que a escada para peixes com ranhura vertical apresenta uma maior agitação do escoamento dentro dos tanques em relação aos outros dois modelos. Acredita-se que além da diferença na geometria dos defletores, outro fator que afeta o comportamento da energia cinética é a relação comprimento/largura do tanque. Embora para uma mesma geometria de defletor não tenha sido variado o comprimento do tanque, acredita-se que ao aumentar este valor, ocorra a diminuição da agitação dentro do tanque, aumentando as zonas de descanso. Há a necessidade de estudos que verifiquem este comportamento e que analisem o comportamento dos peixes em diferentes condições. Acredita-se que existam condições ótimas de turbulência do escoamento, que não causam a fadiga dos indivíduos, mas asseguram a atividade reofílica dos peixes.

CAPÍTULO 6

6 Sugestões para Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho surgiram vários questionamentos quanto aos caminhos a seguir. Como comentado no texto, há muitas variáveis envolvidas na questão da transposição de peixes e, até o momento, poucos critérios de dimensionamento claramente definidos e corretamente relacionados com a ictiofauna.

A partir dos estudos realizados e resultados encontrados dentro da pesquisa desta tese de doutorado, pode-se indicar alguns aspectos que devem ser avaliados na continuidade das pesquisas nessa área.

Em relação à abordagem das características hidráulicas do escoamento verifica-se a necessidade do estudo detalhado em outros tipos e geometrias de escadas para peixes, confirmando a influência da declividade do canal, do tipo de defletor, do tamanho do tanque, da relação comprimento/largura dos tanques, das descargas, entre outros, nos padrões da turbulência do escoamento.

Quanto ao aspecto biológico, devem ser realizados estudos em paralelo sobre a capacidade natatória de peixes de diferentes espécies presentes nos rios brasileiros. Além dos valores das velocidades características, é necessário que seja verificada a tolerância dessas espécies a diferentes características da turbulência. Dos itens avaliados neste trabalho, com base em avaliações biológicas qualitativas e informações da literatura, verificam-se indícios de que a energia cinética da turbulência e as tensões de Reynolds podem ser bons indicativos da turbulência no comportamento dos peixes. Assim, através do estudo de diferentes espécies de peixes, devem ser associados valores limites destes parâmetros, que possam ser confrontados com as características hidráulicas de cada estrutura de transposição, em busca da otimização destes sistemas para os próximos projetos, considerando fatores biológicos, hidráulicos e econômicos.

As informações hidráulicas obtidas em estudos experimentais devem ser utilizadas para calibrar os modelos computacionais do escoamento. A medida que cresce o número de informações experimentais, pode-se verificar o grau de confiabilidade dos modelos numéricos e fornecer subsídios para a melhora dos mesmos.

Uma proposta para implantação a longo prazo consiste na criação de um banco de dados com informações das espécies conhecidas das diferentes bacias brasileiras, com as

características natatórias (quando conhecidas), integradas às características hidráulicas de diferentes MTP e dados obtidos do monitoramento dos sistemas existentes. Esses dados poderiam ser úteis durante o processo de concepção de um novo MTP, buscando cada vez mais integrar o projeto hidráulico com as necessidades da ictiofauna. Esse tipo de informação seria útil não só para os projetistas, mas para os órgãos ambientais, que poderiam contar com critérios mais consistentes para a avaliação de novos empreendimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDERSON, S.; LOHRMANN, A. Open water test of the SonTek Acoustic Doppler Velocimeter. Proceedings of the IEEE Fifth Working Conference on Current Measurements, Buffalo, New York, 1995.
2. ANDREW, F. J. Relatório não publicado, 1948.*
3. BEACH, M.H. Fish pass design – criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fish in rivers. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Directorate of Fisheries Research. Fisheries Research. Technical Report. No 78, Lowestoft, 1984.
4. BELL, M. C. Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria, U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, Oregon, 1973 (1º Ed.), 1986 (2º Ed.), 1990 (3º Ed.).
5. BLANCKAERT, K, LEMMIN, U. Means of noise reduction in acoustic turbulence measurements. Journal of Hydraulic Research, v. 44, nº 1, p. 3-17, 2006.
6. BLAXTER, J. H. S. Swimming speeds of fish. FAO Fish. Rep., 62 (1): 69-100, 1969.*
7. BRASIL, Decreto Nº 24.643, de 10 de julho de 1934, “Código de Águas”, Artigo 143: *Em todos os aproveitamentos de energia hidráulica serão satisfeitas exigências acauteladoras dos interesses gerais:..... f) da conservação e livre circulação do peixe, 1934.*
8. BRASIL, Decreto-Lei Nº 794, de 19 de outubro de 1938, “Primeiro Código de Pesca”, Artigo 68: *As represas dos rios, ribeirões e córregos, devem ter, como complemento obrigatório, obras que permitam a conservação da fauna fluvial, seja facilitando a passagem dos peixes, seja instalando estações de piscicultura.*
9. BRASIL, Lei Delegada Nº 10, de 11 de outubro de 1962, *cria a Superintendência do Desenvolvimento da Pesca (SUDEPE) a quem compete aplicar o Código da Pesca e a legislação das atividades ligadas à pesca e aos recursos pesqueiros.*
10. BRASIL, Decreto-Lei Nº 221, de 28 de dezembro de 1967, *Dispõe sobre a proteção e estímulos à pesca e dá outras.*
11. BRASIL, Portaria Nº 01 de 04 de janeiro de 1977. *Dispõe sobre as barragens que implicarem na alteração de cursos d’água, 1977.*

12. BRETT, J. R. The respiratory metabolism and swimming performance and sustained swimming speed of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Journal Fish. Res. Board Can.*, n. 23, p. 1183-1226, 1964.*
13. BUNT, C. M., Fishway entrance modifications enhance fish attraction. *Fisheries Management and Ecology*, nº 8, p. 95-105, 2001.
14. CADA, G. G., COUTANT, C. C., WHITNEY, R. R. Development of biological criteria for the design of advanced hydro power turbines. DOE/ID – 10578. Preparado para U.S. DOE, Idaho Falls, ID, 1997.
15. CADA, G. F., COUTANT, C. C., WHITNEY, R. R. Development of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines. Department of Energy, U:S., 85 p., 1997.
16. CADA, G. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries*, v. 26, nº 9., 2001. (disponível em: www.fisheries.org)
17. CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. Barragens e Peixes – Análise crítica e recomendações, Boletim 116, 115p, 1999.
18. CEA, L., Análisis experimental del flujo turbulento en una escala de peces mediante tecnología ADV. TIT, Programa de Doutorado en Enxeñería Civil (2001-2003). Universidade da Coruña. 35 p, 2003.
19. CHIU *et al.*, Fish Sustainability - Assessing Blockages and Prioritizing Passages. Thesis. University of Maryland, 264p, 2002.
20. CHOW, V. T. Open-Channel Hydraulics . McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 680, p1959.
21. CLAY, C. H, Design of fishways and other fish facilities. Dept. of Fisheries of Canada, Ottawa, 301p, 1961.*
22. CLAY, C. H, Design of fishways and other fish facilities. (2nd ed). Boca Raton, Lewis, 248p, 1995.
23. COLETTI, J. Z., Características do escoamento ao longo de uma escada de peixes do tipo ranhura vertical, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS, 2005.
24. COLLECTV. CollectV, Software Manual, Version 3.2, Nortek USA, 32p, 2000.

25. DOE (Department of Energy). Relatório anual do Departamento de Energia do Estados Unidos, 30 p., 2001.
26. EAD, S.A., KATOPODIS, C., SIKORA, G. J., e RAJARATNAM, N. Flow regimes and structure in pool and weir fishways. *J. Environ. Eng. Sci.*, 3, 379-390, 2004.
27. ESPÍRITO SANTO, Decreto Normativo 4.489-N, de 15/07/99, do Estado do Espírito Santo, Regulamenta a implantação de mecanismo de transposição para peixe, 1999.
28. FRANCA, M. J., LEMMIN, U. Eliminating velocity aliasing in acoustic Doppler velocity profiler data. *Meas. Sci. Technol*, 17, p. 313-322, 2006.
29. GARCÍA, C. M.; CANTERO, M. I.; NIÑO, Y., GARCÍA, M. H. Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 131, n. 12, p. 1062-1073, 2005.
30. GOBIN, A., GUÉNAUX, G. La pisciculture en eaux douces, 348 p, J. B. Baillièrre et Fils, Paris, France, 1907.*
31. GODOY, M. P. Aqüicultura – Atividade multidisciplinar, Escadas e outras facilidades para passagens de peixes, Estações de piscicultura, Eletrosul – Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A., Florianópolis, Julho, 1985.
32. GORING, D. G., NIKORA, V. I. Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, n. 1, p. 117-126, 2002.
33. HEAPE, E. Emigration, migration and nomadism. Cambridge, Heffer, 369 p. 1931.*
34. HIDRICON, Dispositivo para Transposição por Peixes, Projeto Hidráulico Básico, Critérios de Projeto. Consórcio da UHE de Igarapava, Projeto Executivo, Novembro, 1998a.
35. HIDRICON, Dispositivo para Transposição por Peixes, Projeto Básico, Relatório Final. Consórcio da UHE de Igarapava, Projeto Executivo, Dezembro, 1998b.
36. HOLDEN, M. J., RAITT, D. F. S. (Editors). *Manual of fisheries science, Part 2 - Methods of resource investigation and their application*. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1974.
37. HORIZONADV. *HorizonADV, User Guide*, Sontek, 32p, 2005.
38. JUNHO, R. A. C., TAMADA, K. Estudos hidráulicos em modelo reduzido de escadas de peixes tipo vertical slot. XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulico, São Paulo, Outubro, 2004.

39. KAMULA, R., BÄRTHERL, J. Effects of modifications on the hydraulics of Denil fishways. *Boreal Environment Research*. No 1/2000, 5: 67-79, 2000.
40. KAMULA, R. *Flow over weirs whit application to fish passage facilities*, Academic Dissertation, Department of Process and Environmental Engineering, University of Oulu, Finland, 2001.
41. KATOPODIS, C., RAJARATNAM, N.C. A review and laboratory study of the hydraulics of Denil fishways, *Can. Tech. Rep. Fish. Aquatic Sci.* No 1145, 181 p., 1983.
42. KATOPODIS, C., RAJARATNAM, N., WU, S., TOWELL, D. Denil fishways of varying geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 123(7):624-631, 1997.
43. KIM, J. H. Hydraulic characteristics by weir type in a pool-weir fishway. *Ecological Engineering*, V. 16, Issue 3, 425-433, January 2001.
44. LARINIER, M. Passes a bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 326-327: 45-72, 1992.
45. LARINIER, M. Environmental issues, dams and fish migration, In: *Dams, fish and fisheries. Opportunities, challenges and conflict resolution*, (Editor: Marmulla.), FAO, Fisheries Technical Paper, Roma, p 45-90, 2001.
46. LARINIER, M. Biological factors to be take into account in the design of fishways, the concept of obstructions to upstream migration. In: *Fishways: biological basis, design criteria and monitoring*, Bull. FR. Pêche Piscic. n°364, 28-38, 2002a.
47. LARINIER, M. Location of fishways. In: *Fishways: biological basis, design criteria and monitoring*, Bull. FR. Pêche Piscic. n°364, 39-53, 2002b.
48. LARINIER, M. Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels. In: *Fishways: biological basis, design criteria and monitoring*, Bull. FR. Pêche Piscic. n°364, 54-82, 2002c.
49. LARINIER, M., TRAVADE, F. *Downstream migration: problems and facilities*, Bull. FR. Pêche Piscic. n°364, 2002.
50. LEMMIN, U., LHERMITTE, R. Discussion of “ADV Measurements of Turbulence: Can We Improve Their Interpretation?” by Nikora, V. I. y Goring, D. G. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 9, p. 987-988, 1999.
51. LEMMIN, U., ROLLAND, T. Acoustic Velocity Profiler for Laboratory and Field Studies. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 123, n. 12, p. 1089-1098, 1997.

52. LHERMITTE, R., LEMMIN U. Open-Channel Flow and Turbulence Measurement by High-Resolution Doppler Sonar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 11, p. 1295-1308, 1994.
53. LIAO, J. C., BEAL, D. N., LAUDER, V., TRIANTAFYLLOU, M. S. Fish Exploiting Vortices Decrease Muscle Activity. *Science*, v. 302, 1566-1569, 2003.
54. LIU, M. Turbulence Structure in Hydraulics Jumps and Vertical Slot Fishways. Thesis, University of Alberta, 313 p., 2004.
55. LIU, M.; RAJARATNAM, N., ZHU, D. Z. Turbulence Structure of Hydraulic Jumps of Low Froude Numbers. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 130, n. 6, p. 511-520, 2004.
56. LIU, M.; RAJARATNAM, N., ZHU, D. Z. Mean Flow and Turbulence Structure in Vertical Slot Fishways, *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 132, n. 8, p. 765-777, 2006.
57. LOHRMANN, A., CABRERA, R., GRAUS, N. C. Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for laboratory use. *Proceedings of the ASCE Conference on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, Buffalo, New York, 1994.
58. LOHRMANN, A., CABRERA, R., GELFENBAUM, G., HAINES, J. Direct Measurements of Reynolds Stress with an Acoustic Doppler Velocimeter. *Proceedings of the IEEE Fifth Working Conference on Current Measurements*, Buffalo, New York, 1995.
59. LOISEAU, F., DAVIDSON, R. A., COUSTON, M., SABOURIN, M. Fish Environment & New turbines design (Alstom), 23rd IAHR Symposium, Yokoham, 2006.
60. LOPARDO, R. A. e HENNING, R. E. Efectos de las condiciones de ingreso al resalto sobre el campo de presiones instantáneas. In: XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, São Paulo, Brasil, vol.1 p. 116-127, 1986 apud LOPARDO, R. A. **Apunte sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico**. In: APOSTILA DO CURSO DE TURBULÊNCIA, CAVITAÇÃO E AERAÇÃO DE FENÔMENOS HIDRÁULICOS. São Paulo, 45 p., 1986.
61. LUPANDIN, A. I. Effect of Flow Turbulence on Swimming Speed of Fish. *Biology Bulletin*, v. 32, 461-466, 2005.
62. MACHADO *et al.* Contribuição ao estudo da capacidade piscícola do Rio Pardo no Estado de São Paulo. Secret. Agríc., DPA, DPPPAS, São Paulo, Publ. nº 6, 46 p., São Paulo, 1968.*

63. MAGALHÃES, V. P. F. Viabilidade do uso de sistema regenerador de energia acoplado ao sistema de atração em mecanismos de transposição para peixes - o caso da UHE Igarapava. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, 2004.
64. MALLEEN-COOPER, M., STUART, I. G. Optimising Denil fishways for passage of small and large fishes. *Fisheries Management and Ecology*, v. 14, 61-71, 2007.
65. MARMULLA, G. (Editor), Dams, fish and fisheries. Opportunities, challenges and conflict resolution. FAO, Fisheries Technical Paper, Roma, 166p., 2001.
66. MARTIN, V., FISHER, T., MILLAR, R, QUICK, M. ADV Data Analysis for Turbulent Flows: Low Correlation Problem. *Proceedings of Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, 2002.
67. MARTINS, S. L. Sistemas para a Transposição dos Peixes, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP, 2000.
68. MARTINS, S. L. Sistemas para a Transposição de Peixes Neotropicais Potamódromos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP, 2005.
69. MARTINS, S. L., TAMADA, K. Sistemas para a Transposição de Peixes, São Paulo: EDUSP, 30p., 2000.
70. MEDINA, V., BATEMAN, A., VELASCO, D. Estudio Detallado de los parámetros de configuración de un velocímetro acústico de alta frecuencia (ADV, Acoustic Doppler Velocimeter). *Proceedings of the XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 2002, La Habana, Cuba, 2002.
71. MEYER, G.S. Usage of anadromous, catadromous and allied terms for migratory fishes. *Copeia*, 89–97, 1949.*
72. MINAS GERAIS, Lei 12.488, de 9 de abril de 1997 do Estado de Minas Gerais, “Torna obrigatória a construção de escadas para peixes de piracema em barragem edificada pelo estado”, 1997a.
73. MINAS GERAIS, Artigo 20º do Decreto Lei nº 38.744, de 9 de abril de 1997 do Estado de Minas Gerais, “Exige a construção de mecanismos de transposição para peixes para o licenciamento ambiental de novas usinas hidrelétricas”, 1997b.
74. MÜLLER, A. C. Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento. McGraw-Hill Ltda. São Paulo, 1995.

75. MUNSON, B. R., YOUNG, D. F., OKIISHI, T. H. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos (Tradução da 2ª edição americana), Vol. 1, Ed. Edgard Blücher Ltda, 2004. 412 p.
76. NIKOLSKY, G. V. (L. Birkett, Transl.), Ecology of fishes. London, Academic Press, 352 p., 1963.*
77. NIKORA, V. I., GORING, D. G. ADV Measurements of Turbulence: Can We Improve Their Interpretation? Journal of Hydraulic Engineering, v. 124, n. 6, p. 630-634, 1998.
78. NORTEK. Nortek 10 MHz Velocimeter, Operations Manual, Nortek USA, 30p, 2000.
79. ODEH, M. (editor). Innovations in fish passage technology. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 1999a.
80. ODEH, M. A summary of environmentally friendly turbine design concepts. DOE/ID/13741. Preparado para U. S. Department of Energy, Idaho Operations Office, Idaho Falls, Idaho, 1999b.
81. ODEH, M., NOREIKA, J. F., HARO, A., MAYNARD, A., CASTRO-SANTOS, T., CADA, G. F. Evaluation of the Effects of Turbulence on the Behavior of Migratory Fish, Final Report 2002, Report to Bonneville Power Administration, Contract No. 00000022, Project No. 200005700, 55 electronic pages (BPA Report DOE/BP-00000022-1)
82. PARÁ, Lei nº 5.886 de 5 de abril 1995, do Estado do Pará. “Obriga a construção de escadas de peixes em barramentos”, 1995.
83. PAVLOV, D. S., Structures assisting the migration of non-salmonid fish, USSE, FAO Fish. Tech. Pap. No. 308. FAO, Rome, 1989.
84. PAVLOV, D. S., LUPANDIN, A. I., KOSTIN, V. V. Downstream migration of fish through dams of hydroelectric power plants. Trans. T. Albert, trans. Ed. G. F. Cada. ORNL/TR-02/02. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2002.
85. PENA, L. Estudio hidráulico en modelo de escalas de peixes de fenda vertical e de fenda profunda aliñadas. Aproximación á avaliación experimental da enerxía cinética turbulenta. Tese de Doutoramento, Programa de Doutoramento de Enxeñería Civil, Universidade da Coruña, 2004.
86. PETRERE JUNIOR, M. Migraciones de peces de agua Dulce en América Latina: algunos comentarios. COPESCAL Doc. Ocas., 17p, 1985.*
87. PODDUBNYI, A. G., ESPINACH ROS, A., OLDANI, N. Recursos ícticos del Paraná Médio en relación con la construcción de obras hidráulicas (Memorias y

- recomendaciones). Inf. Téc. Agua Emerg-Gerencia Estud. Proyect Paraná Médio, Santa Fe, Argentina, 105 p, 1981.*
88. POMPEU, P. S. e MARTINEZ, C. B. A transposição de peixes através de elevadores com caminhões-tanque. PCH notícias e SHP News, Ano 5, n.18., 22-23, 2003.
89. POMPEU P. S., MARTINEZ, C. B. Estabelecimento da Regra Operativa de um Mecanismo de Transposição de Peixes do Tipo Elevador com Caminhão-Tanque, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, out/dez, 31-42, 2005.
90. POMPEU, P. S. e MARTINEZ, C. B. Variações temporais na passagem de peixes pelo elevador da Usina Hidrelétrica de Santa Clara, rio Mucuri, leste brasileiro. Revista Brasileira de Zoologia, 23 (2): 340 – 349, 2006.
91. PUERTAS, J., PENA, L., TEIJEIRO, T. Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, January, p. 1-14, 2004,
92. QUIRÓS, R., Structures Assisting the Migrations of Non-Salmonid Fish Latin America, Copescal Technical Paper, FAO – Food and Agricultura Organization of the United Nation, Roma, 41 p, 1989.
93. RAJARATNAM, N. e KATOPODIS, C., Hydraulics of Denil Fishways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110 (9), 1219-1233, 1984.
94. RAJARATNAM, N., VINNE, V. D., KATOPODIS, C., Hydraulics of vertical slot fishways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 112, n. 10, October, 1986.
95. RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C e MAINALI, A., Plunging and Stream Flow in Pool and Weir Fishways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114, 939-944, 1988.
96. RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C., SOLANKI, S. New design for vertical slot fishways. Canadian Journal of Civil Engineering. Volume 19, Número 3, 402-414, 1992.
97. RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C., WU, S., SABUR, M.A. Hydraulics of resting pools for Denil fishways. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 123, No.7, p. 632-638, 1997.
98. RODI, W. Turbulence models and their application in hydraulics. IAHR Monograph. Delft, The Netherlands, 1980.*
99. Safe Habor Water Power Comporation. Endereço eletrônico: <http://www.shwpc.com/fishlift.html>, acesso 08/03/2007.

100. SANTO, M., Dispositivos de passagens para peixes em Portugal. Direcção Geral dos Recursos Florestais, Lisboa, 2005.
101. SANTOS, H. A., Metodologia de Medição de Velocidade Prolongada Crítica e de Explosão das Espécies de Peixes Migradoras do Brasil, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, 2004.
102. SANTOS, H. A., A Influência da Capacidade Natatória de Peixes Neotropicais no Projeto Hidráulico de Mecanismos de Transposição, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, 2007.
103. SÃO PAULO, Lei Nº 2.250, de 28 de dezembro de 1927, *Dispõe que todos quantos, para qualquer fim, represarem as águas dos rios, ribeirões e córregos, são obrigados a construir escadas que permitam a livre subida dos peixes*, 1927.
104. SÃO PAULO, Lei Nº 9.798 , de 7 de outubro de 1997, *Dispõe sobre a construção de escadas para peixes em barragens edificadas em cursos de água de domínio do Estado*, 1997.
105. SMITH, B. T., BLEVINS, M., DARBY, D., DINKINS, R., LOISEAU, P. Measurement of hydroturbine draft tube turbulence with Acoustic-Doppler Velocimeters. Proceedings of Hydraulic Measurements and Experimental Methods, 2002.
106. SONG, T., CHIEW, Y. M. Turbulence measurement in nonuniform open-channel flow using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). Journal of Engineering Mechanics, vol. 127, No.3, p. 219-232, 2001.
107. SONTEK. Sontek ADVField Acoustic Doppler Velocimeter. Technical Documentation. San Diego, USA, 2001.
108. TORLONI, C. E. C. A Conservação da Ictiofauna e as Escadas para Peixes. Publ. CESP, 7 p., São Paulo, 1984.*
109. TRUJILLO ZEVALLOS, M. L., TAMADA, K. Sistema Hidráulico Tipo Borland de Passagem para Peixes: Análise e Aspectos Hidráulicos e Ictiológicos. São Paulo: EPUSP, 26p, 2001.
110. TURNPENNY, A. W. H., DAVIS, M. H., FLEMING, J. M, DAVIES, J. K. Experimental studies relating to the passage of fish and shrimps through tidal power turbines. Marine and Freshwater Biology Unit, National Power, Fawley, Southampton, Hampshire, England, 1992.*

111. U. S. Fish and Wildlife Service – memorando, 1981.*
112. VIANA, E. M. F., Mapeamento do Campo de Velocidades em Mecanismos de Transposição de Peixes do Tipo Slot Vertical em Diferentes Escalas, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, 2005.
113. VICENTINTI, G. C., FARIA V., E. M., SANTOS, H. A., MARTINEZ, C. B. Estudo do comportamento de *Astyanax Bimaculatus* em modelo reduzido de escada de peixes. XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil, 2004.
114. VICENTINI, G. C. Levantamento da Velocidade Prolongada de Peixes – Um Estudo de Caso com o Mandi (*Pimelodus Maculatus*), Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, 2005.
115. VIDELER, J. J. Fish Swimming. Editora Chapman & Hall, London, UK, 260 p., 1993.
116. VONO, V. Primeira avaliação da eficiência do mecanismo de transposição para peixes na UHE Igarapava (Rio Grande – MG/SP). XIV Encontro Brasileiro de Ictiologia. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo (RS), 2001.
117. VOULGARIS, G., TROWBRIGDE, J. H. Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 15, p. 272-289, 1998.
118. WAHL, T. L. Analyzing ADV Data Using WinADV. Proceedings of the Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management 2000, Minneapolis, Minnesota, 2000.
119. WAHL, T. L. Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data” by Goring, D. G. e Nikora, V. I. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 9, p. 987-988, 2003.
120. WARDLE, C. S. Limit of fish swimming speed. *Nature*, London, 225: 725-727, 1975.*
121. WEBB, P. W. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. *Bull. Fish. Rep. Bd. Can.*, 190, 158 p., 1975.*
122. WELCOMME, R. L. River Fisheries, FAO Fish. Tech. Pap., 330p., 1985.*
123. WHITE, F. M., Mecânica dos Fluidos. 4ª edição, Editora Mc Graw Hill, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

124. WU, S., RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C. Structure of flow in vertical slot fishway. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 4, April, 1999.

Endereços na rede mundial de computadores:

www.ahefunil.com.br/home/educacional/stp.htm acessado em 15/05/2007

www.dnr.sc.gov/news/Yr2006/feb20/feb20_lift.html em 22/02/2007.

www.itaipu.gov.br em 12/07/2007.

www.shwpc.com/fishlift.html acesso em 08/03/2007.

www.sontek.com em 05/07/2005.

www.uhe-igarapava.com.br em 05/02/2007.

* Referência consultada indiretamente.

ANEXOS

Dos anexos fazem parte os seguintes itens:

Anexo 1: Descrição Geral da UHE de Igarapava

Anexo 2: Avaliação das Medições com o ADV e Filtros Adequados aos Dados

Anexo 3: Avaliação da Influência do Comprimento da Conexão Tomada-transdutor

Anexo 4: Campos de Velocidade Média Adimensionalizados

Anexo 5: Campos de Energia Cinética da Turbulência Adimensionalizada

Anexo 1: Descrição Geral da UHE de Igarapava

A Usina hidrelétrica de Igarapava localiza-se no Rio Grande, entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, abrangendo os municípios de Conquista e Sacramento (MG) e Igarapava e Rifaina (SP). A área de inundação do reservatório é de 36,51 km², e o volume médio acumulado é de 234,5x10⁶ m³. O reservatório é operado a fio d'água com N.A. máximo normal na El. 512,00 m e N.A. mínimo normal na El. 511,50 m.

A barragem da UHE de Igarapava é do tipo de terra, com comprimento de 740 m na margem direita e 125 m na margem esquerda. A crista tem 10 m de largura, altura máxima de 32 m na margem direita e 10 m na margem esquerda. O vertedouro de superfície, localizado no leito do rio, possui 6 comportas do tipo segmento de 13,5 m de largura e 18,15 m de altura.

A casa de força possui 5 unidades geradoras com turbinas tipo Kaplan Bulbo com velocidade de rotação de 112,5 rpm, vazão nominal por turbina de 275 m³/s com uma queda bruta máxima de 18,30 m. Cada turbina tem potência nominal de 42 MW, totalizando uma potência instalada de 210 MW.

Em 1999 foi construída a escada para peixes junto à margem esquerda da UHE de Igarapava. A escada para peixes é do tipo ranhura vertical, com 282 m de comprimento e declividade de 6%. A escada possui 87 tanques de dissipação e está dividida em três trechos conectados por tanques curvos sem declividade. As Figuras A1.1 e A1.2 mostram uma vista geral da estrutura e um detalhe da mesma, respectivamente. O dispositivo foi projetado para operar entre os meses de outubro e fevereiro, devendo ser utilizado com maior intensidade entre os meses de novembro e janeiro.

O MTP de Igarapava possui um sistema chamado de sistema auxiliar ou de atração. Sua função é captar água diretamente do reservatório e levar até a entrada da escada para aumentar a vazão e, conseqüentemente, a velocidade nessa região, na tentativa de criar uma zona de maior atratividade para os peixes. Com o uso do sistema auxiliar é possível aumentar a vazão na entrada da escada sem aumentar a vazão no canal de transposição, o que tornariam as condições dentro dos tanques menos favoráveis (maiores velocidades). Enquanto a vazão média na escada para peixes é de 1,50 m³/s, a vazão de atração é, em média, de 3,70 m³/s. (Projeto do MTP da UHE de Igarapava, Hidricon, 1998a e 1998b).



Figura A1.1 – Vista aérea da escada para peixes da UHE Igarapava. Fonte: Magalhães (2004).



Figura A1.2 – Vista de um trecho da escada para peixes da UHE Igarapava.

Anexo 2: Medições com o ADV e Aplicação de Filtros aos Dados

Os princípios de funcionamento do ADV foram apresentados no item 3.2.2.3. Neste anexo procura-se descrever as principais limitações desse equipamento e as medidas que foram adotadas neste trabalho para melhorar a qualidade das séries de medições. Inicialmente, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre medições utilizando velocímetros Doppler.

A2.1 Revisão Bibliográfica sobre Velocímetros Acústicos Doppler (ADV)

O velocímetro acústico Doppler – ADV (“*Acoustic Doppler Velocimeter*”) foi desenvolvido, inicialmente, em 1992, em contrato com o U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES), para medir velocidades em três direções ortogonais em modelos físicos. De acordo com Lohrmann *et al.* (1994), algumas das exigências no desenvolvimento desse equipamento diziam respeito à resolução das medições, frequências de aquisição de, pelo menos, 25 Hz e custos inferiores a US\$10.000,00 (10% do custo de um medidor LDV – “*Laser Doppler Velocimeter*”). Outros itens relevantes referem-se ao desenvolvimento de um sistema com a mínima necessidade de recalibração e possibilidades de medições em posições próximas das fronteiras.

As medições através do efeito Doppler dependem da velocidade do som, que por sua vez é influenciado pela temperatura e pela salinidade da água. Segundo Sontek (2001), uma mudança de 5°C na temperatura ou 12 ppm na salinidade resulta na mudança da velocidade do som em 1%. A variação da velocidade do som afeta as medições de dois modos: na conversão da defasagem Doppler em velocidade e no posicionamento do volume de medição.

Sontek (2001) apresenta equações para corrigir o valor da velocidade devido à realização de ensaios com valores incorretos de salinidade e temperatura da água. Segundo Lohrmann *et al.* (1994), a velocidade do som pode variar entre 1440 m/s em águas frias e doces, até 1540 m/s, em água quentes e salgadas. Sem calibração, a velocidade do som de 1490 m/s poderia resultar em erros de até 3,3% na velocidade medida, sendo esse valor reduzido para 0,2%, quando há controle da variação de temperatura com erro de 1°C. Sendo assim, o erro na avaliação do valor de velocidade, pela falta do monitoramento da salinidade da água, pode ser considerado desprezível. A Figura A2.1 mostra a variação da velocidade do som em função da temperatura e da salinidade.

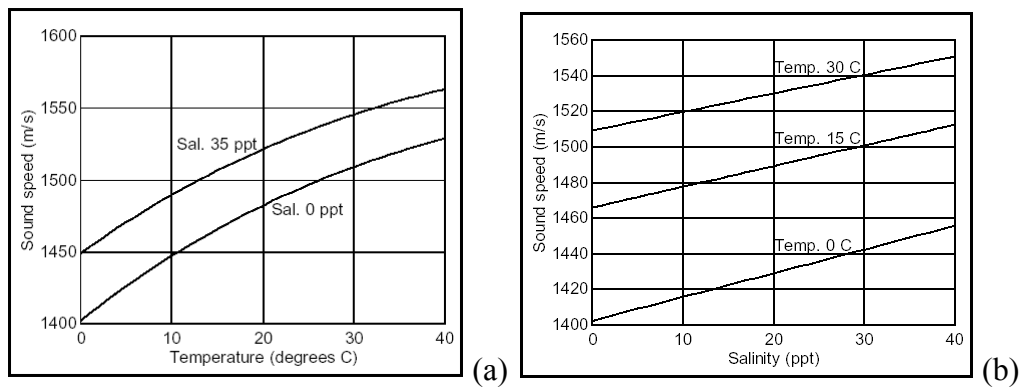


Figura A2.1 – (a) velocidade do som versus temperatura; (b) velocidade do som versus salinidade. Fonte: Sontek (2001).

Lohrmann *et al.* (1994) procuraram verificar o comportamento do ADV para uma grande variedade de situações de operação. Nos testes iniciais, os autores verificaram a versatilidade do equipamento na facilidade da instalação e na possibilidade de operação em diferentes fluxos, obtendo valores de velocidade em concordância com os obtidos com outros medidores. A maioria dessas comparações foi realizada através de características estatísticas, tais como média, desvio padrão e espectros de potência.

Lohrmann *et al.* (1994) realizaram um estudo comparativo de dados obtidos com o ADV e com o LDV, verificando a concordância das velocidades médias e das flutuações obtidas com os dois equipamentos.

A avaliação de características turbulentas do escoamento através de medições com o ADV representa um item de grande interesse pela maior parte dos pesquisadores na área. A parte turbulenta do escoamento pode ser representada pelas flutuações da velocidade em relação ao valor médio. As medições através do ADV apresentam ruído Doppler, que é inerente ao processo, estando este relacionado com a distribuição aleatória das partículas que compõem cada valor de velocidade medida. Por isso, para a correta avaliação das características turbulentas, é necessário que sejam identificadas no sinal medido, as flutuações decorrentes do próprio escoamento e as provenientes do ruído. Segundo Lohrmann *et al.* (1994), nem sempre é possível prever as magnitudes do ruído antes da realização das medições, porque sempre há um grau de incerteza em relação às condições “reais” do escoamento.

Segundo Lohrmann *et al.* (1994), o ruído Doppler é um ruído branco e pode ser facilmente identificado no espectro de potência. Os autores verificaram que as medições com o ADV resultam em valores maiores de energia da turbulência, enquanto a avaliação das tensões de Reynolds não demonstraram diferenças significativas ao serem comparados dados do LDV e do ADV.

Durante a aquisição dos dados de velocidade, são armazenados, para cada instante, os valores de SNR (“*signal-to-noise ratio*”). O nível de ruído N é medido no início de cada seqüência de medição e é aproximadamente igual ao nível de ruído eletrônico para o ADV. Sendo I o sinal medido, a relação sinal-ruído – SNR – pode ser definida a partir da equação (A2.1). Os valores de SNR estão relacionados à quantidade de partículas suspensas na água. Assim, um valor mais elevado de SNR indica a existência de maior concentração de partículas, que resulta em medições de melhor qualidade.

$$SNR = 10 \log_{10} \left[\frac{I}{N} \right] \quad (A2.1)$$

Nos experimentos de Lohrmann *et al.* (1994) verificou-se que um valor de SNR de 15 dB é suficiente para obter dados com níveis aceitáveis de ruído para a frequência de aquisição de 25 Hz. Para a frequência de 1 Hz, o valor de 5 dB é suficiente.

Nikora e Goring (1998) propuseram uma técnica para a estimativa do ruído Doppler presente nas medições com o ADV. A proposta dos autores consiste em um procedimento bastante simples: primeiro são realizadas as medições de velocidade instantânea no escoamento em questão, depois as componentes do ruído seriam obtidas em uma porção em repouso da água utilizada no experimento e então esse ruído seria retirado do sinal original, para então avaliar os parâmetros de turbulência.

Nikora e Goring (1998) verificaram que o espectro e a distribuição de probabilidades indicam que o ruído Doppler é um ruído branco de comportamento Gaussiano, com maiores níveis de ruído para as componentes horizontais da velocidade. Também se observou que o tipo de partículas presentes na água altera os níveis de ruído, por exemplo, os autores acreditam que a presença de bolhas de ar poderia aumentar entre 4 e 5 vezes a magnitude das componentes do ruído. Um problema apontado pelos próprios autores na utilização desse método consiste no fato de que uma das fontes de ruído não é reproduzida, que é a turbulência de pequena escala, não resolvendo completamente o problema da eliminação do ruído do sinal. Os autores afirmam que o ruído provoca grandes diferenças nas avaliações de energia da turbulência, do coeficiente de assimetria e do coeficiente de curtose, principalmente para as componentes horizontais, mesmo para escoamentos com altos níveis de turbulência.

Em 1999, Lemmin e Lhermitte criticam o trabalho de Nikora e Goring (1998) em uma discussão do referido artigo. Lemmin e Lhermitte (1999) são enfáticos no fato que o ruído Doppler é função da velocidade da água e que medições na água em repouso não necessariamente representam a magnitude do ruído Doppler para situações da água em movimento.

Voulgaris e Trowbridge (1998) compararam o comportamento das medições com o ADV e o LDV com modelos semi-empíricos para escoamento em canais com superfície livre. Esses autores verificaram que o ADV mede valores médios de velocidade e da tensão de Reynolds com 1% de erro em relação ao valor “real”. Outro ponto interessante abordado por Voulgaris e Trowbridge (1998) diz respeito à avaliação da influência da distância da fronteira sólida ao volume de medição. A comparação das medições do ADV com os valores obtidos em modelos semi-empíricos demonstram que para a avaliação de velocidades médias, estas podem ser obtidas para posições inferiores a 1 cm da fronteira sólida, enquanto para a tensão de Reynolds, para distâncias superiores a 3 cm.

Segundo Voulgaris e Trowbridge (1998), a avaliação da variância das velocidades horizontais e verticais é superestimada em até 50% e 120%, respectivamente, para as medições realizadas com o LDV. Por outro lado, o ADV é melhor para a avaliação da variância vertical em relação à variância horizontal, pela própria geometria e princípio de funcionamento do equipamento.

Outros estudos vêm sendo realizados com o intuito de avaliar os erros cometidos ao se obter parâmetros de turbulência a partir de medições de velocidade utilizando o ADV, bem como há diversas proposições de aplicação de filtros aos dados, com o objetivo de eliminar os efeitos do ruído.

Goring e Nikora (2002) apresentam um método para detectar os “*spikes*” nas séries de velocidades obtidas com o ADV. Esse método é chamado pelos autores de “*Phase-Space Thresholding Method*” e aqui trataremos pelas iniciais PSTM. Nesse método, os pontos são plotados de tal maneira que as variáveis e derivados destes são confrontados entre si.

Da série original u_i , geram-se as séries de dados derivados através das equações a seguir:

$$\Delta u_i = \frac{(u_{i+1} - u_{i-1})}{2} \quad (\text{A2.2})$$

$$\Delta^2 u_i = \frac{(\Delta u_{i+1} - \Delta u_{i-1})}{2} \quad (\text{A2.3})$$

Os dados $u_i \times \Delta u_i$, $u_i \times \Delta^2 u_i$ e $\Delta u_i \times \Delta^2 u_i$ são plotados e após são traçadas envoltórias baseadas no critério universal (de acordo com Goring e Nikora, 2002), que delimitam os dados que podem ser aproveitados, dos dados que representam ruído.

⁵ *Spikes* são dados da série de valores medidos que sobre-saem dos demais.

A definição dessas envoltórias com forma de elipse baseiam-se nos máximos valores esperados para uma série de dados aleatórios com distribuição normal. O valor absoluto máximo esperado é dado por:

$$E(\xi_i |_{\max}) = \sqrt{2 \ln n} = \lambda_U \tag{A2.4}$$

sendo n o número de dados de uma amostra com distribuição normal e λ_U o termo representativo do limiar universal.

No PSTM considera-se que os dados seguem os limites de uma distribuição aleatória normal, com desvio padrão $\hat{\sigma}$ e média igual a zero, cujo valor absoluto máximo esperado é dado por:

$$\lambda_U \cdot \hat{\sigma} = \sqrt{2 \ln n} \cdot \hat{\sigma} \tag{A2.5}$$

Goring e Nikora (2002) apresentam detalhadamente o processo de definição das envoltórias. Na Figura A2.2 apresenta-se um exemplo de aplicação do processo para a série de dados (a), onde se observa uma grande quantidade de “spikes”, e para a série (b), cujo comportamento indica pouco ruído no sinal.

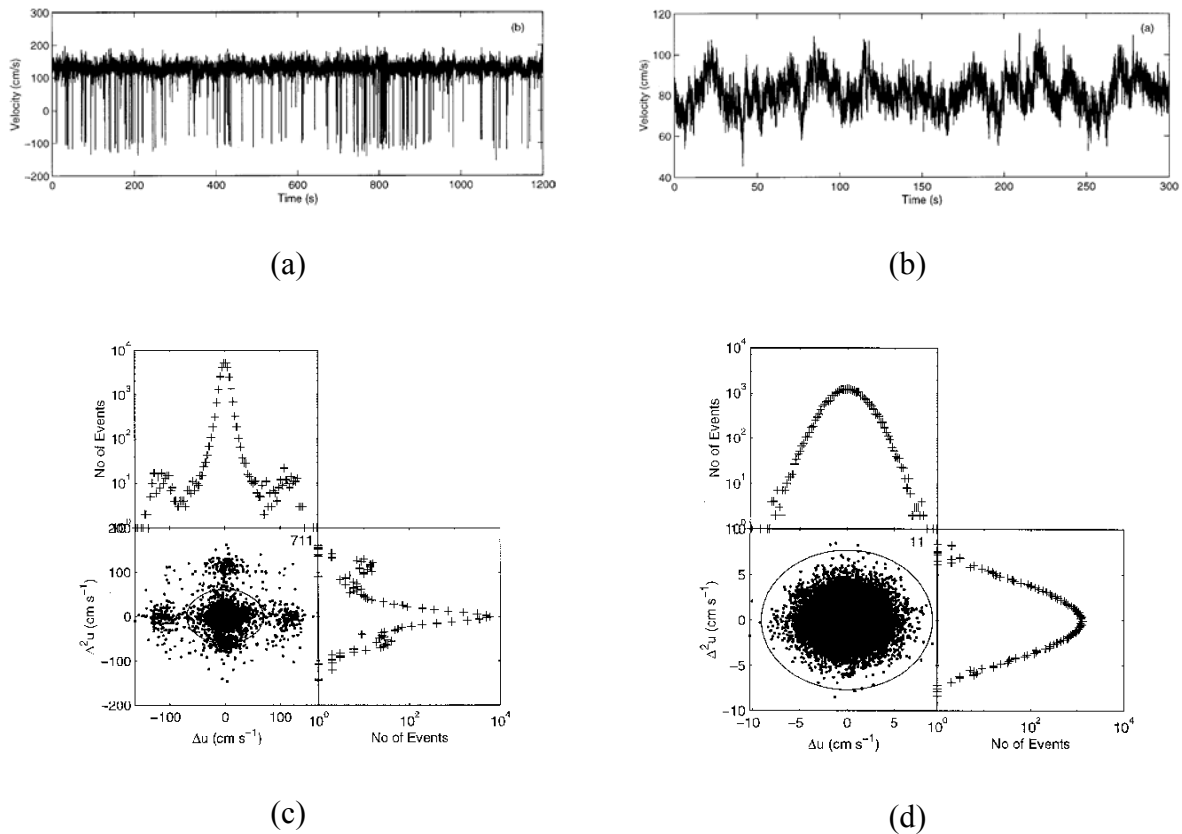


Figura A2.2 – (a) série de dados com “spikes”; (b) série de dados “limpa”; (c) PSTM aplicado a série (a); PSTM aplicado a série (b).

Nas Figuras A2.2 (c) e (d) tem-se a aplicação do processo do PSTM, sendo que os valores que ficam do lado externo da elipse são retirados da amostra e podem ser substituídos ou não. Goring e Nikora (2002) propõem alguns métodos para a substituição dos valores retirados.

O programa WinADV foi desenvolvido por Tony Wahl para a visualização e pós-processamento dos dados obtidos com o ADV, inicialmente no Laboratório de Pesquisas em Recursos Hídricos do Bureau of Reclamation, estando disponível ao público desde 1996 (Wahl, 2002). Esse programa vem sendo implementado desde a sua primeira versão em conjunto com a SonTek Inc.

Wahl (2003) apresenta, em uma discussão sobre o trabalho de Goring e Nikora (2002), algumas alterações no PSTM. Esse método foi então implementado no programa WinADV pelo autor.

Além desses trabalhos, outros pesquisadores têm avaliado as questões relacionadas às medições utilizando o efeito Doppler: Lhermitte e Lemmin (1994); Lohrmann *et al.* (1995), Anderson e Lohrmann (1995), Lemmin e Rolland (1997); Martin *et al.* (2002), Medina *et al.* (2002), Liu *et al.* (2004), García *et al.* (2005), Franca e Lemmin (2006); Blanckaert e Lemmin (2006); entre outros.

A2.2 Definição dos Parâmetros de Ensaio

Em uma etapa inicial foram testados os parâmetros de ensaio a fim de definir as melhores configurações. Esta avaliação baseou-se na variação dos parâmetros de ensaios, verificando a influência na avaliação dos momentos estatísticos: média, desvio padrão, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose. Essa metodologia foi aplicada para os dois velocímetros, da marca Sontek e da marca Nortek, nas estruturas A e B, respectivamente. A seguir apresentam-se apenas alguns dados analisados:.

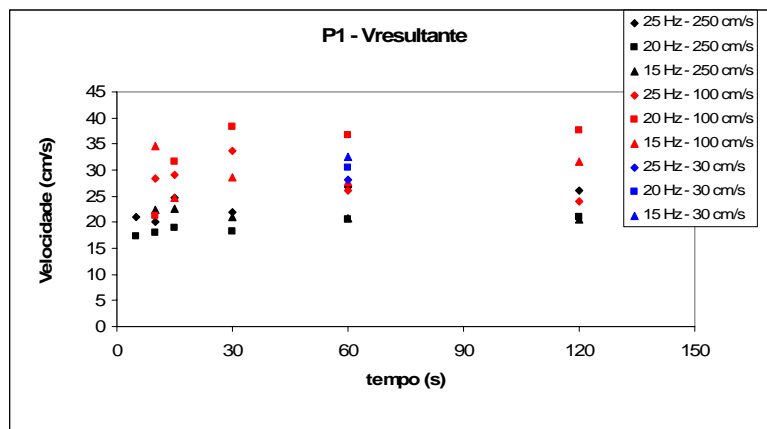
Os parâmetros investigados foram:

- tempo de aquisição dos dados – foram avaliadas amostras com até 6 minutos de duração;
- frequência de amostragem – até a frequência máxima de cada modelo dos equipamentos (25 Hz para Nortek e 50 Hz para Sontek);
- tamanho do volume de medição – variável para o velocímetro Nortek;
- faixa de velocidade – testaram-se três faixas nominais: 30 cm/s; 100 cm/s e 250 cm/s;

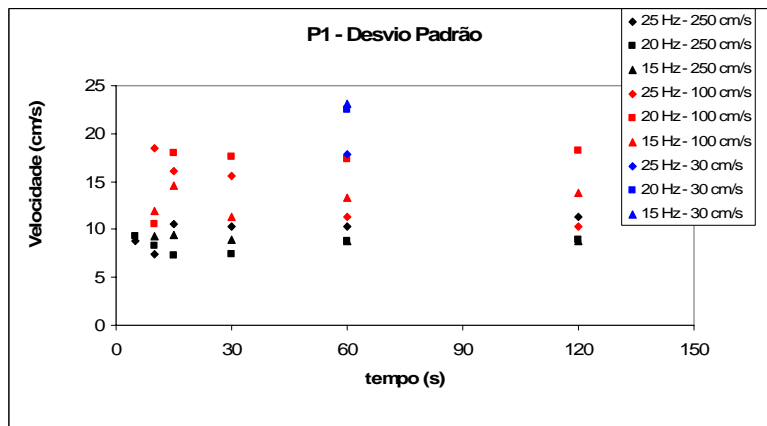
Foram selecionadas duas posições do escoamento dentro do modelo de passagem para peixes com descarregador de superfície, sendo: ponto (1) situa-se no centro do tanque, a,

aproximadamente, 20 cm da superfície, em uma região de baixas velocidades, e o ponto (2) está localizado na região sobre a soleira do vertedouro, onde ocorrem as maiores velocidades. Optou-se por avaliar os parâmetros dos ensaios para essas duas posições, com o objetivo de observar a influência dos mesmos, para os diferentes tipos de escoamento que ocorrem no tanque.

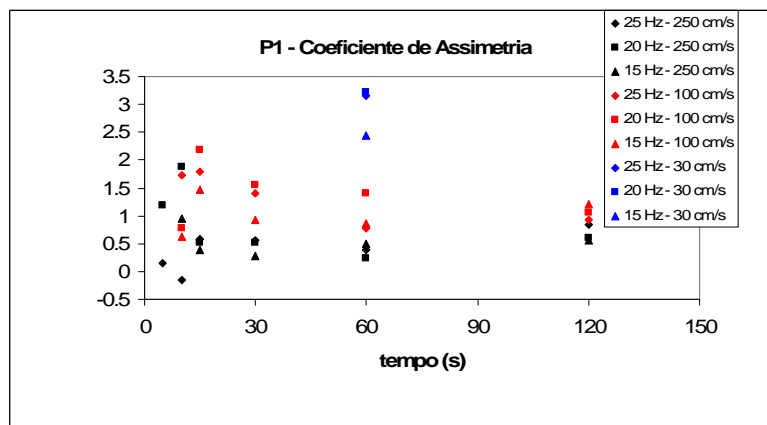
A Figura A2.3 mostra a variação da média (a), desvio padrão (b), coeficiente de assimetria (c) e coeficiente de curtose (d) da série de velocidades resultantes ($V=(V_x^2+V_y^2+V_z^2)^{0,5}$) do ponto (1) descrito acima, para tempos de amostragem desde 5 s até 120 s, para diferentes faixas de velocidade (30; 100 e 250 cm/s) e para frequências de aquisição de 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz.



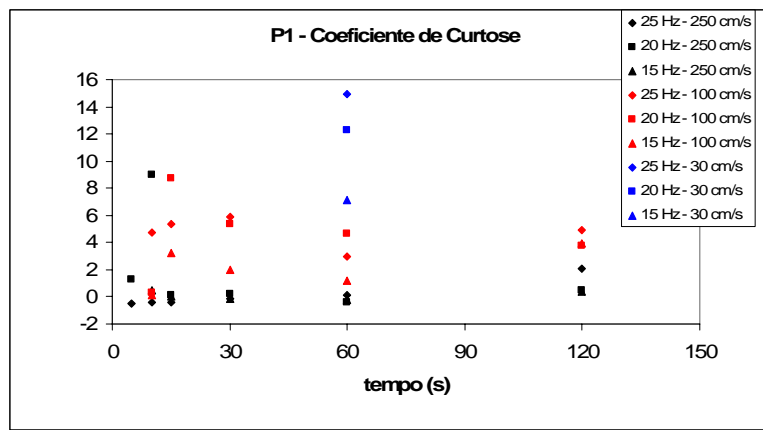
(a)



(b)



(c)



(d)

Obs: P1 – ponto no centro do tanque do modelo com descarregador de superfície a, aproximadamente, 20 cm da superfície livre.

Considerando que o coeficiente de curtose é igual a zero para uma distribuição normal.

Figura A2.3 – Avaliação dos momentos estatísticos: (a) média; (b) desvio padrão; (c) coeficiente de assimetria; (d) coeficiente de curtose; no ponto P1, para diferentes frequências, faixas de velocidade e tempos de aquisição.

A avaliação da influência dos parâmetros de ensaio nas respostas aos momentos estatísticos, para o ponto P1 (Figura A2.3) e demais pontos, abrangendo o escoamento com diferentes características dentro de uma escada para peixes, levaram à definição das configurações do equipamento. Na seqüência comenta-se cada uma delas:

Tempo de aquisição: observou-se, para os pontos analisados que, para aquisições com mais de 30 s os momentos estatísticos permaneciam com uma mesma tendência. Considerando uma folga, adotou-se o tempo de aquisição igual a **90 s**.

Frequência de amostragem: para medições através do efeito Doppler maiores frequências de amostragem associam-se a maiores variâncias do sina. Para os momentos estatísticos não se observou influência significativa da frequência de aquisição nos resultados, sendo assim, optou-se pela utilização da máxima frequência possível em cada um dos equipamentos.

Volume de medição: optou-se por trabalhar com o volume de medição padrão para o equipamento da marca Nortek (cubo com aresta de 9 mm), visto que ao diminuir o mesmo, a variância aumenta, o que não é desejável. No velocímetro da Sontek também se utilizou a configuração padrão (cilindro, com 6 mm de diâmetro da base e 9 mm de altura).

Faixa de velocidades: em escoamentos turbulentos, a correlação⁶ dos dados tende a diminuir aumentando o ruído nas medições de velocidade. Sontek (2001) recomenda que o desvio padrão dos valores de velocidade medidos deve ser inferior a 5% da faixa nominal. Essa medida possibilita a diminuição do coeficiente de correlação e do ruído dos dados, sendo assim, optou-se por utilizar a mesma faixa de velocidade (± 250 cm/s) em todos os pontos de medição. No centro das recirculações dos tanques seria possível a utilização de uma faixa inferior, no entanto, com esse tipo de procedimento a dificuldade operacional do processo de medição aumentaria demasiadamente, sem um ganho tão significativo nos resultados.

A2.3 Aplicação de Filtros aos Dados

Logo a partir do início das medições de velocidade utilizando o ADV nos tanques de escadas para peixes, verificou-se a necessidade da avaliação dos dados e a possível existência de ruído inerente ao uso do ADV inserido no sinal. Observava-se, até mesmo visualmente, a diferença do tipo de sinal em diferentes condições do escoamento: (a) com menores velocidades; (b) com presença de bolhas de ar (Figura A2.4); (c) próximo às fronteiras e (d) com velocidades muito elevadas.



Figura A2.4 – Posição de medição selecionada para a avaliação dos filtros com presença de bolhas de ar.

Sabe-se que o sistema de medição Doppler apresenta um ruído elétrico incorporado aos dados medidos, que é inerente ao processo. De acordo com recomendações dos fabricantes, devem ser seguidos alguns cuidados durante a realização dos ensaios, tal como manter os valores de correlação variando entre 70% e 100%. No entanto, escoamentos com

⁶ Cada valor registrado é proveniente de um conjunto de sinais recebidos pelo ADV, sendo a correlação um parâmetro referente a esse conjunto.

certas características como turbulência e aeração elevadas, não possibilitam alcançar esses níveis, o que significa que os dados registrados terão uma quantidade maior de ruído. Apesar disso, mesmo com valores baixos de correlação (a partir de 30%), podem-se avaliar valores de velocidades médias.

Dessas condições e das recomendações dos fabricantes, Nortek (2000) e Sontek (2001), que alertam que além da existência de ruído branco no sinal, inerente ao processo de medição, algumas condições do escoamento, como aeração e turbulência elevada, podem prejudicar o sinal, verificou-se a necessidade da aplicação de um filtro às séries de dados.

Conforme verificado na literatura, há vários estudos que procuram mensurar os erros na avaliação de parâmetros de turbulência do escoamento a partir de medições de velocidade com o ADV, e há algumas proposições para uso de filtros.

Na bibliografia tem-se conhecimento de duas pesquisas que realizaram medições dos campos de velocidades utilizando ADV em tanques de escadas para peixes. Puertas *et al.* (2004) e Pena (2004) realizaram medições em uma passagem para peixes do tipo ranhura vertical utilizando um ADV da marca Sontek. Esses autores não comentam sobre a aplicação de filtros aos dados. Outro estudo foi realizado por Liu (2004) e Liu *et al.* (2006), que utilizaram o filtro PSTM sobre os dados obtidos em uma escada do tipo ranhura vertical.

Odeh *et al.* (2002) realizaram medições com o ADV a jusante de uma comporta, com o objetivo de avaliar os efeitos da turbulência no comportamento dos peixes. Aos dados de Odeh *et al.* (2002) aplicou-se um filtro que preservou apenas os sinais com correlação superior a 70% e relação sinal-ruído (SNR) superior a 15 dB, conforme recomendações do fabricante.

A pesquisa bibliográfica permitiu verificar que não há um consenso sobre o tipo de filtro a ser aplicado aos dados obtidos com o ADV. Alguns autores chegaram a estimar as variações nos parâmetros turbulentos “reais” e medidos. No entanto, sabe-se que esse valor “real” é, na maioria das situações, difícil de ser definido.

Sendo assim, em uma etapa preliminar deste trabalho, optou-se pela avaliação de diferentes filtros e verificação da influência destes na determinação dos parâmetros de turbulência. Para tanto, utilizou-se do programa WinADV, para a aplicação dos filtros aos dados.

A Figura A2.5 apresenta os pontos escolhidos em um tanque da passagem de peixes do tipo ranhura vertical para avaliação dos filtros. Teve-se o cuidado de selecionar as diferentes regiões do escoamento (jato e recirculações). Para cada ponto foram consideradas quatro profundidades do escoamento (distantes 1 cm do fundo e 10%, 25% e 80% da altura média do escoamento, a partir do fundo do canal).

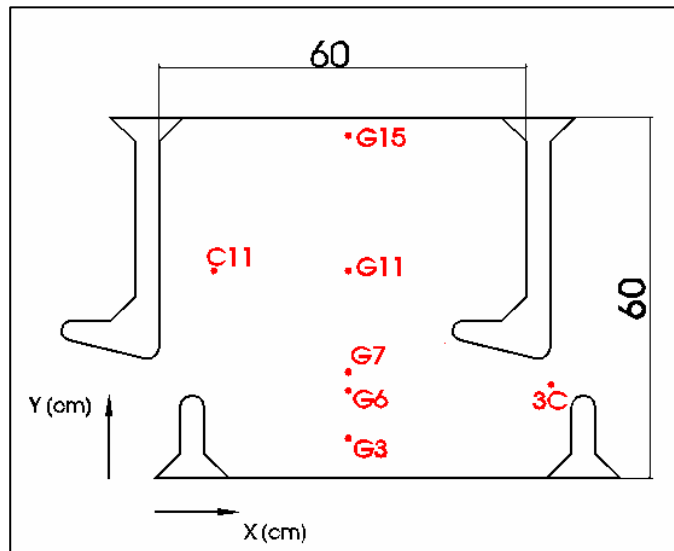


Figura A2.5 – Pontos selecionados para a avaliação dos filtros.

Os filtros avaliados foram os seguintes:

1. Correlação > 30%
2. Correlação > 50%
3. Correlação > 50% e SNR > 10
4. Correlação > 70%
5. Correlação > 70% e SNR > 15 (recomendado pelos fabricantes)
6. “Acceleration” – recomendado para séries com baixos valores de Correlação e SNR normal
7. “Communication errors” – recomendado para eliminar problemas que podem ocorrer em medições em campo
8. PSTM – proposto por Goring e Nikora (2002) e Wahl (2003)
9. Correlação > 50% e PSTM

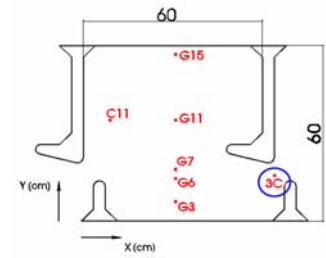
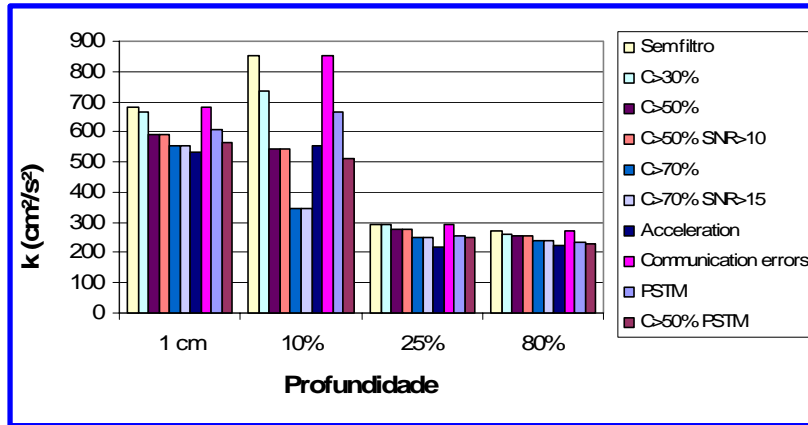
Foram avaliados a energia cinética da turbulência, as tensões de Reynolds no plano xy e o percentual de dados resultantes após a aplicação do filtro, comparando estes resultados com os mesmos obtidos sem a aplicação do filtro.

As Figuras A2.6, A2.7 e A2.8 apresentam os resultados obtidos para os pontos 3C, G11 e G15, conforme apresentado na Figura A2.5. As tabelas A2.1, A2.2 e A2.3 apresentam os resultados para todos os pontos testados.

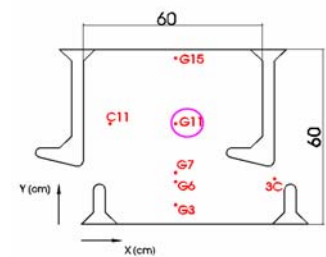
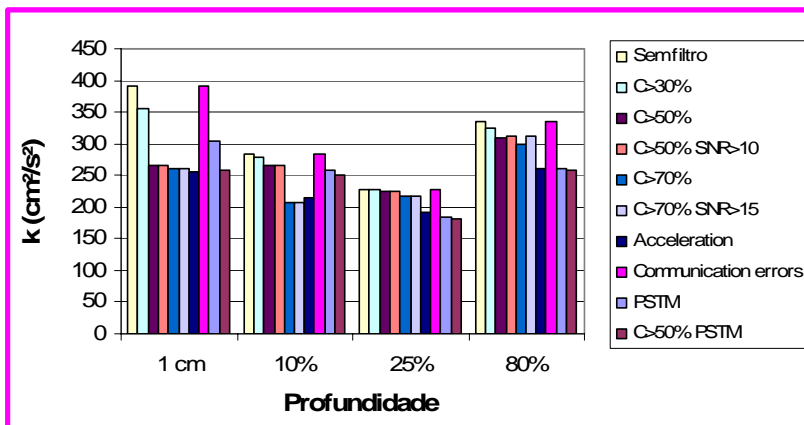
Essa avaliação mostra que o critério proposto pelos fabricantes de considerar apenas os dados com correlação superior a 70% e relação sinal-ruído superior a 15 dB, neste caso, não é a melhor opção, sendo necessário utilizar outros critérios.

A partir da avaliação desses resultados, optou-se pela utilização do filtro PSTM, desenvolvido por Goring e Nikora (2002) e modificado e implementado no programa WinADV por Wahl (2003). Observou-se que a aplicação desses filtros nos dados, retira da série de dados os “spikes” e, ao mesmo tempo, mantém um grande percentual dos dados na amostra, na maior parte das vezes superior a 80% do total. A figura A2.9 mostra séries de dados antes e após a aplicação desse filtro, onde pode ser verificado o efeito produzido pelo mesmo. Verifica-se que com a aplicação do filtro PSTM, os valores de energia cinética da turbulência são reduzidos em, aproximadamente, 20%, e a tensão de Reynolds no plano xy, em média, 15%, em relação aos resultados obtidos sem utilização do filtro. Não se pode afirmar que a aplicação do filtro reduz todos os efeitos do ruído.

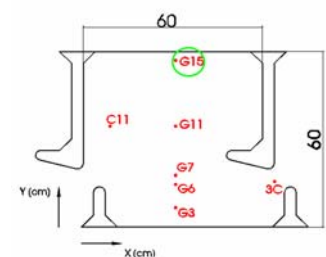
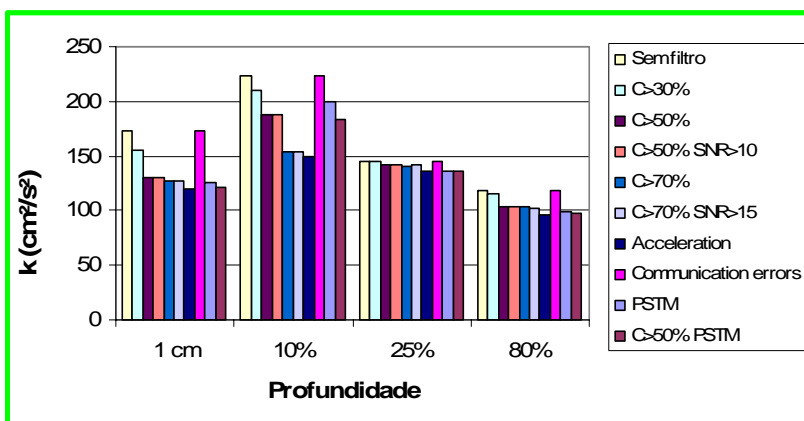
Verificou-se que para as medições realizadas próximas às fronteiras (distante 1 cm do fundo), existem limitações dos dados para a avaliação de parâmetros de turbulência, mesmo com a aplicação dos filtros. Isso explica o comportamento observado nos campos de diferentes parâmetros, apresentados neste texto, situados próximos ao fundo.



(a)

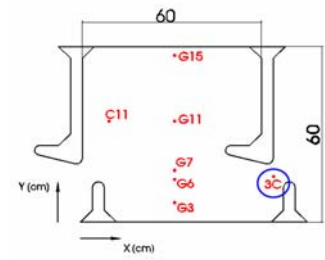
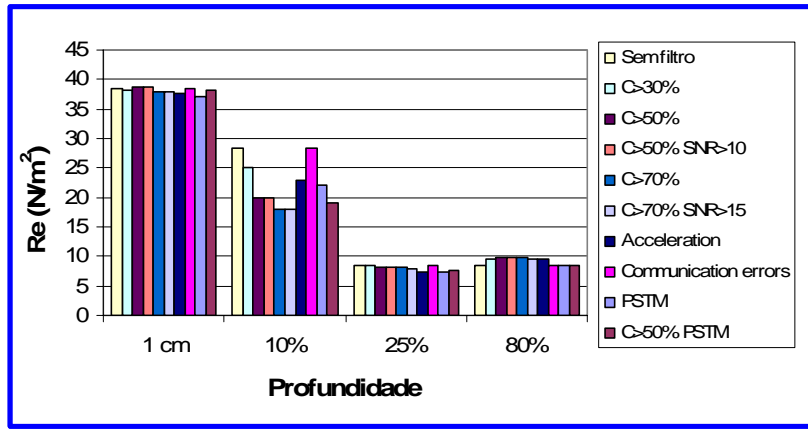


(b)

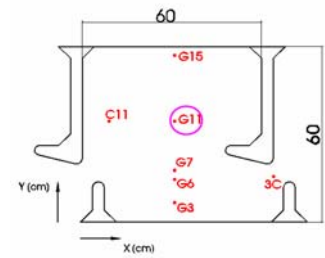
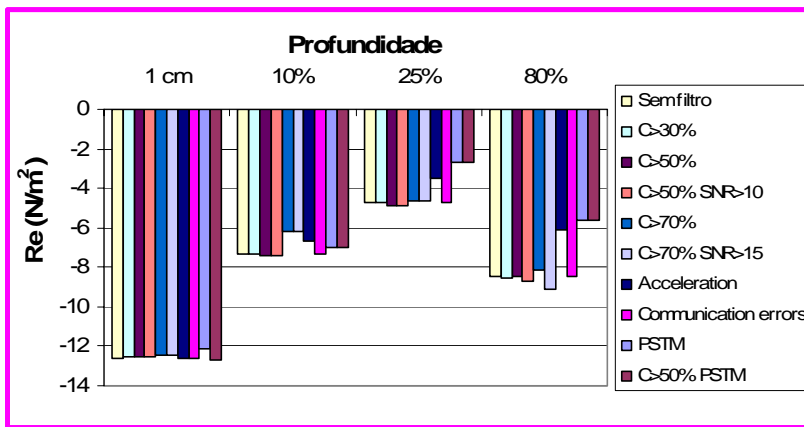


(c)

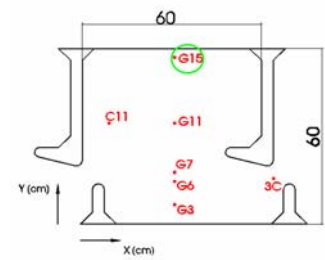
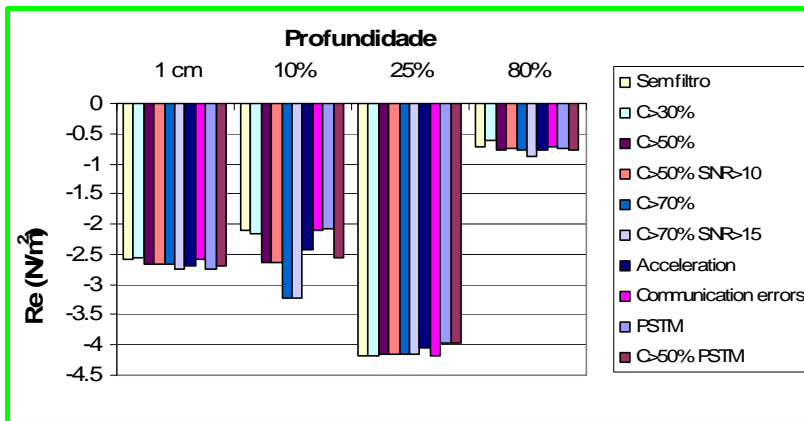
Figura A2.6 – Influência do tipo de filtro utilizado na avaliação da energia cinética da turbulência para três pontos: (a) 3C; (b) G11 e (c) G15, de acordo com a representação ao lado de cada gráfico.



(a)

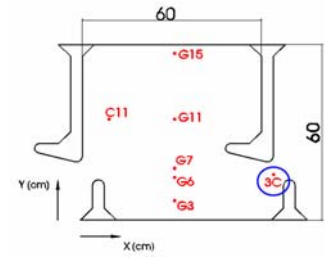
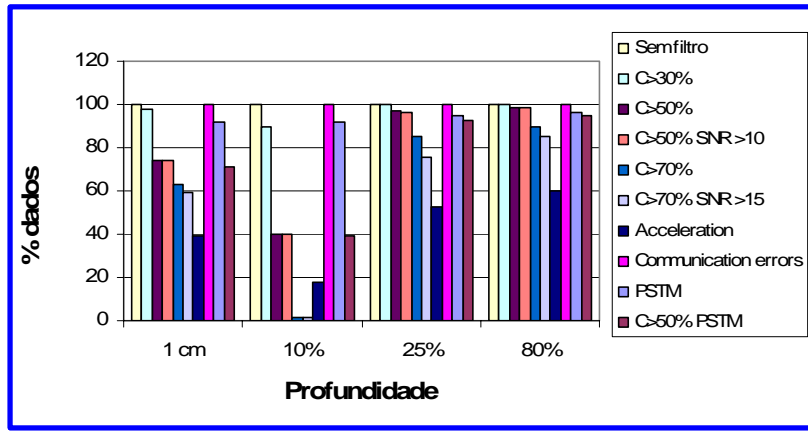


(b)

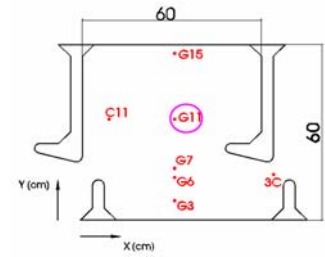
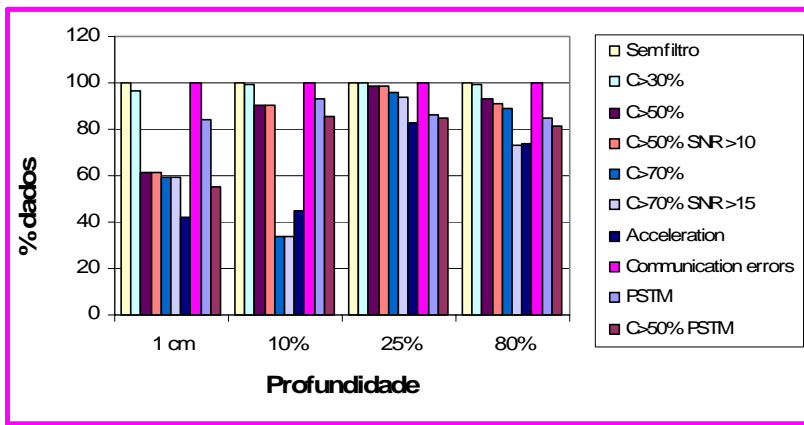


(c)

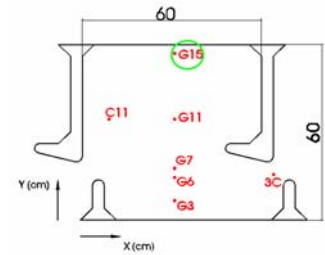
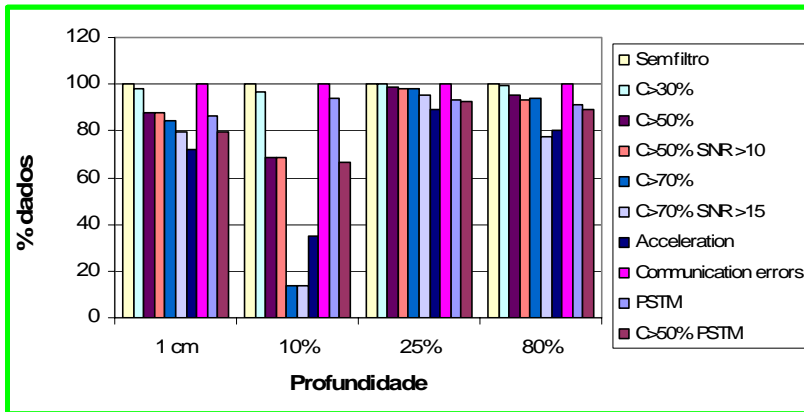
Figura A2.7 – Influência do tipo de filtro utilizado na avaliação da tensão de Reynolds no plano xy para três pontos: (a) 3C; (b) G11 e (c) G15, de acordo com a representação ao lado de cada gráfico.



(a)



(b)



(c)

Figura A2.8 – Percentual de dados restantes após a aplicação dos diferentes processos de filtro para os três pontos: (a) 3C; (b) G11 e (c) G15, de acordo com a representação ao lado de cada gráfico.

Tabela A2.1: Energia cinética da turbulência considerando diferentes filtros (cm^2/s^2).

| Ponto | Profundidade (m) | Sem filtro | C>30% | C>50% | C>50% SNR>10 | C>70% | C>70% SNR>15 | Accelera tion | Commu nication errors | PSTM | C>50% PSTM |
|-------|------------------|------------|--------|--------|--------------|--------|--------------|------------------|-----------------------------|--------|---------------|
| 3C | 0,010 | 684,15 | 667,67 | 591,98 | 591,98 | 551,77 | 554,21 | 533,79 | 684,15 | 608,66 | 566,98 |
| | 0,038 | 850,03 | 735,18 | 541,18 | 541,29 | 346,66 | 346,66 | 552,50 | 850,03 | 666,44 | 512,65 |
| | 0,095 | 293,43 | 291,51 | 276,37 | 276,17 | 252,30 | 252,16 | 220,21 | 293,43 | 255,39 | 252,04 |
| | 0,304 | 273,38 | 260,40 | 256,72 | 256,63 | 241,27 | 241,32 | 221,23 | 273,38 | 231,73 | 230,99 |
| C11 | 0,010 | 675,50 | 372,26 | 99,39 | 99,39 | 93,80 | 93,80 | 110,61 | 675,50 | 277,26 | 85,57 |
| | 0,038 | 132,53 | 128,79 | 122,11 | 122,07 | 111,07 | 111,33 | 105,83 | 132,53 | 109,97 | 109,08 |
| | 0,095 | 104,57 | 99,50 | 89,66 | 89,60 | 88,35 | 87,81 | 86,61 | 104,57 | 86,93 | 85,92 |
| | 0,304 | 135,65 | 130,64 | 123,08 | 123,14 | 122,35 | 122,70 | 118,16 | 135,65 | 114,14 | 113,71 |
| G11 | 0,010 | 391,62 | 355,80 | 267,07 | 267,07 | 261,42 | 261,39 | 255,48 | 391,62 | 305,35 | 258,09 |
| | 0,038 | 283,36 | 279,67 | 266,82 | 266,82 | 207,44 | 207,44 | 214,35 | 283,36 | 257,20 | 249,85 |
| | 0,095 | 228,46 | 227,37 | 223,92 | 223,94 | 216,61 | 217,02 | 192,93 | 228,46 | 182,82 | 182,36 |
| | 0,304 | 334,95 | 323,77 | 310,44 | 312,53 | 299,80 | 312,54 | 260,41 | 334,95 | 260,34 | 259,42 |
| G15 | 0,010 | 173,52 | 154,90 | 129,53 | 129,51 | 127,37 | 127,56 | 120,02 | 173,52 | 126,32 | 120,64 |
| | 0,038 | 223,12 | 210,56 | 187,40 | 187,40 | 153,43 | 153,43 | 150,04 | 223,12 | 199,57 | 183,89 |
| | 0,095 | 144,90 | 144,34 | 141,44 | 141,47 | 141,08 | 141,34 | 136,64 | 144,90 | 136,21 | 136,26 |
| | 0,304 | 118,48 | 114,80 | 104,13 | 104,09 | 103,76 | 102,49 | 96,47 | 118,48 | 98,43 | 97,04 |
| G3 | 0,010 | 440,78 | 416,26 | 330,45 | 330,45 | 323,58 | 323,72 | 301,80 | 440,78 | 357,60 | 308,07 |
| | 0,038 | 400,34 | 389,01 | 350,93 | 350,93 | 259,84 | 259,84 | 294,92 | 400,34 | 362,94 | 335,69 |
| | 0,095 | 357,95 | 355,09 | 352,00 | 352,00 | 333,34 | 334,11 | 295,30 | 357,95 | 318,96 | 318,83 |
| | 0,304 | 444,77 | 418,94 | 401,50 | 402,66 | 372,12 | 380,74 | 340,09 | 444,77 | 379,59 | 375,22 |
| G6 | 0,010 | 433,60 | 432,51 | 424,11 | 424,11 | 413,78 | 415,01 | 376,23 | 433,60 | 408,93 | 408,47 |
| | 0,038 | 638,88 | 621,99 | 557,91 | 557,91 | 388,33 | 388,33 | 496,98 | 638,88 | 612,85 | 551,02 |
| | 0,095 | 644,83 | 638,03 | 633,55 | 633,55 | 609,54 | 611,25 | 540,54 | 644,83 | 607,50 | 606,84 |
| | 0,304 | 551,92 | 542,07 | 528,51 | 527,42 | 523,26 | 513,58 | 524,38 | 551,92 | 528,40 | 519,76 |
| G7 | 0,010 | 443,50 | 439,86 | 428,98 | 428,98 | 414,22 | 414,01 | 394,61 | 443,50 | 419,98 | 416,77 |
| | 0,038 | 516,87 | 506,16 | 472,40 | 472,40 | 402,68 | 402,68 | 398,37 | 516,87 | 494,91 | 463,41 |
| | 0,095 | 586,79 | 582,83 | 578,39 | 578,39 | 571,29 | 571,11 | 544,99 | 586,79 | 567,80 | 564,81 |
| | 0,304 | 448,84 | 443,74 | 435,65 | 435,37 | 430,86 | 423,16 | 433,28 | 448,84 | 432,93 | 428,63 |

Tabela A2.2: Tensões de Reynolds no plano xy considerando diferentes filtros (N/m^2).

| Ponto | Profundidade (m) | Sem filtro | C>30% | C>50% | C>50% SNR>10 | C>70% | C>70% SNR>15 | Accelera tion | Commu nication errors | PSTM | C>50% PSTM |
|-------|------------------|------------|--------|--------|--------------|--------|--------------|------------------|-----------------------------|--------|---------------|
| 3C | 0,010 | 38,57 | 38,14 | 38,71 | 38,71 | 37,99 | 37,93 | 37,62 | 38,57 | 36,98 | 38,06 |
| | 0,038 | 28,47 | 25,20 | 19,95 | 19,96 | 18,12 | 18,12 | 22,80 | 28,47 | 22,13 | 19,11 |
| | 0,095 | 8,45 | 8,36 | 8,22 | 8,20 | 8,15 | 7,99 | 7,26 | 8,45 | 7,34 | 7,54 |
| | 0,304 | 8,38 | 9,67 | 9,75 | 9,74 | 9,73 | 9,64 | 9,53 | 8,38 | 8,44 | 8,50 |
| C11 | 0,010 | 12,07 | 5,40 | 0,33 | 0,33 | 0,26 | 0,26 | 0,85 | 12,07 | 3,66 | 0,09 |
| | 0,038 | -2,89 | -3,07 | -3,19 | -3,20 | -3,57 | -3,59 | -3,19 | -2,89 | -3,30 | -3,39 |
| | 0,095 | -1,18 | -1,24 | -1,27 | -1,29 | -1,27 | -1,22 | -1,19 | -1,18 | -1,20 | -1,20 |
| | 0,304 | -2,13 | -2,21 | -2,26 | -2,28 | -2,24 | -2,32 | -2,32 | -2,13 | -2,17 | -2,17 |
| G11 | 0,010 | -12,59 | -12,54 | -12,56 | -12,56 | -12,49 | -12,47 | -12,60 | -12,59 | -12,10 | -12,74 |
| | 0,038 | -7,29 | -7,34 | -7,38 | -7,38 | -6,21 | -6,21 | -6,68 | -7,29 | -6,96 | -6,96 |
| | 0,095 | -4,74 | -4,71 | -4,89 | -4,89 | -4,66 | -4,65 | -3,51 | -4,74 | -2,71 | -2,70 |
| | 0,304 | -8,50 | -8,52 | -8,44 | -8,68 | -8,14 | -9,08 | -6,09 | -8,50 | -5,61 | -5,65 |
| G15 | 0,010 | -2,57 | -2,57 | -2,66 | -2,66 | -2,65 | -2,73 | -2,68 | -2,57 | -2,74 | -2,68 |
| | 0,038 | -2,11 | -2,16 | -2,65 | -2,65 | -3,23 | -3,23 | -2,41 | -2,11 | -2,08 | -2,56 |
| | 0,095 | -4,17 | -4,18 | -4,16 | -4,17 | -4,15 | -4,15 | -4,04 | -4,17 | -3,96 | -3,96 |
| | 0,304 | -0,73 | -0,62 | -0,77 | -0,75 | -0,78 | -0,87 | -0,76 | -0,73 | -0,74 | -0,78 |
| G3 | 0,010 | 13,99 | 13,93 | 14,50 | 14,50 | 14,41 | 14,43 | 13,68 | 13,99 | 13,10 | 13,63 |
| | 0,038 | 9,24 | 8,99 | 8,59 | 8,59 | 7,09 | 7,09 | 7,50 | 9,24 | 8,05 | 8,08 |
| | 0,095 | 7,05 | 7,01 | 7,01 | 7,01 | 6,46 | 6,49 | 5,21 | 7,05 | 5,51 | 5,56 |
| | 0,304 | 11,74 | 11,67 | 11,85 | 11,92 | 11,00 | 11,58 | 10,17 | 11,74 | 10,94 | 11,34 |
| G6 | 0,010 | 17,48 | 17,43 | 17,45 | 17,45 | 17,58 | 17,67 | 16,58 | 17,48 | 17,43 | 17,51 |
| | 0,038 | 23,32 | 23,36 | 21,63 | 21,63 | 14,83 | 14,83 | 22,35 | 23,32 | 22,62 | 21,61 |
| | 0,095 | 27,65 | 27,63 | 27,57 | 27,57 | 27,17 | 27,29 | 24,05 | 27,65 | 26,54 | 26,59 |
| | 0,304 | 14,62 | 14,38 | 14,64 | 14,53 | 15,85 | 15,09 | 17,19 | 14,62 | 14,26 | 14,47 |
| G7 | 0,010 | 16,34 | 16,34 | 15,99 | 15,99 | 16,17 | 16,16 | 17,25 | 16,34 | 16,20 | 16,03 |
| | 0,038 | 16,14 | 16,01 | 15,95 | 15,95 | 13,44 | 13,44 | 15,03 | 16,14 | 15,99 | 15,85 |
| | 0,095 | 21,73 | 21,57 | 22,09 | 22,09 | 24,01 | 24,02 | 24,31 | 21,73 | 21,71 | 22,22 |
| | 0,304 | -1,49 | -1,57 | -1,47 | -1,41 | -1,99 | -1,76 | -1,48 | -1,49 | -1,68 | -1,71 |

Tabela A2.3: Percentual de dados restantes na série após aplicados os diferentes filtros (%).

| Ponto | Profundidade (m) | Sem filtro | C>30% | C>50% | C>50% SNR>10 | C>70% | C>70% SNR>15 | Acceleração | Communication errors | PSTM | C>50% PSTM |
|-------|------------------|------------|-------|-------|--------------|-------|--------------|-------------|----------------------|------|------------|
| 3C | 0,010 | 100,0 | 98,1 | 74,0 | 74,0 | 62,6 | 59,4 | 39,2 | 100,0 | 91,6 | 70,8 |
| | 0,038 | 100,0 | 89,6 | 40,0 | 40,0 | 1,4 | 1,4 | 17,5 | 100,0 | 91,6 | 39,1 |
| | 0,095 | 100,0 | 99,8 | 96,7 | 96,3 | 85,1 | 75,5 | 52,5 | 100,0 | 94,7 | 92,6 |
| | 0,304 | 100,0 | 99,8 | 98,5 | 98,3 | 89,9 | 85,3 | 60,1 | 100,0 | 96,0 | 95,0 |
| C11 | 0,010 | 100,0 | 78,5 | 29,5 | 29,5 | 29,4 | 29,4 | 20,0 | 100,0 | 80,0 | 28,0 |
| | 0,038 | 100,0 | 99,7 | 96,1 | 96,1 | 76,0 | 75,4 | 74,4 | 100,0 | 92,6 | 90,2 |
| | 0,095 | 100,0 | 99,6 | 95,0 | 94,8 | 91,8 | 86,3 | 85,5 | 100,0 | 91,0 | 88,6 |
| | 0,304 | 100,0 | 99,7 | 96,3 | 96,0 | 95,6 | 88,1 | 87,7 | 100,0 | 89,2 | 87,7 |
| G11 | 0,010 | 100,0 | 96,3 | 61,6 | 61,6 | 59,5 | 59,4 | 41,8 | 100,0 | 83,9 | 55,1 |
| | 0,038 | 100,0 | 99,4 | 90,0 | 90,0 | 34,0 | 34,0 | 44,7 | 100,0 | 93,4 | 85,6 |
| | 0,095 | 100,0 | 99,9 | 98,3 | 98,3 | 95,6 | 94,1 | 82,8 | 100,0 | 85,9 | 85,2 |
| | 0,304 | 100,0 | 99,2 | 93,4 | 90,7 | 89,2 | 72,9 | 74,1 | 100,0 | 84,6 | 81,7 |
| G15 | 0,010 | 100,0 | 98,4 | 87,8 | 87,8 | 84,4 | 79,6 | 72,3 | 100,0 | 86,3 | 79,7 |
| | 0,038 | 100,0 | 96,7 | 68,5 | 68,5 | 13,8 | 13,8 | 35,0 | 100,0 | 94,2 | 66,7 |
| | 0,095 | 100,0 | 99,8 | 98,4 | 98,3 | 98,0 | 95,2 | 89,3 | 100,0 | 93,1 | 92,3 |
| | 0,304 | 100,0 | 99,6 | 95,3 | 93,3 | 94,0 | 77,6 | 80,5 | 100,0 | 91,3 | 89,1 |
| G3 | 0,010 | 100,0 | 96,3 | 63,4 | 63,4 | 61,9 | 61,8 | 46,1 | 100,0 | 83,9 | 57,2 |
| | 0,038 | 100,0 | 96,8 | 66,7 | 66,7 | 10,6 | 10,6 | 29,1 | 100,0 | 94,7 | 64,8 |
| | 0,095 | 100,0 | 99,7 | 98,3 | 98,3 | 93,2 | 92,8 | 69,9 | 100,0 | 92,8 | 92,0 |
| | 0,304 | 100,0 | 98,1 | 90,0 | 88,0 | 79,9 | 67,4 | 57,9 | 100,0 | 89,1 | 83,3 |
| G6 | 0,010 | 100,0 | 99,8 | 95,4 | 95,4 | 87,8 | 87,0 | 63,6 | 100,0 | 91,4 | 88,5 |
| | 0,038 | 100,0 | 95,5 | 61,4 | 61,4 | 7,5 | 7,5 | 24,5 | 100,0 | 95,0 | 59,8 |
| | 0,095 | 100,0 | 99,6 | 97,4 | 97,4 | 85,7 | 85,3 | 57,8 | 100,0 | 91,0 | 89,7 |
| | 0,304 | 100,0 | 99,2 | 93,0 | 92,7 | 74,0 | 68,7 | 40,3 | 100,0 | 96,8 | 91,1 |
| G7 | 0,010 | 100,0 | 99,6 | 93,6 | 93,6 | 84,8 | 84,6 | 56,6 | 100,0 | 93,3 | 88,6 |
| | 0,038 | 100,0 | 97,0 | 67,0 | 67,0 | 7,1 | 7,1 | 23,4 | 100,0 | 96,2 | 65,9 |
| | 0,095 | 100,0 | 99,6 | 96,3 | 96,3 | 81,2 | 81,2 | 47,6 | 100,0 | 95,5 | 92,7 |
| | 0,304 | 100,0 | 99,6 | 93,8 | 93,7 | 75,2 | 70,5 | 39,8 | 100,0 | 96,9 | 91,6 |

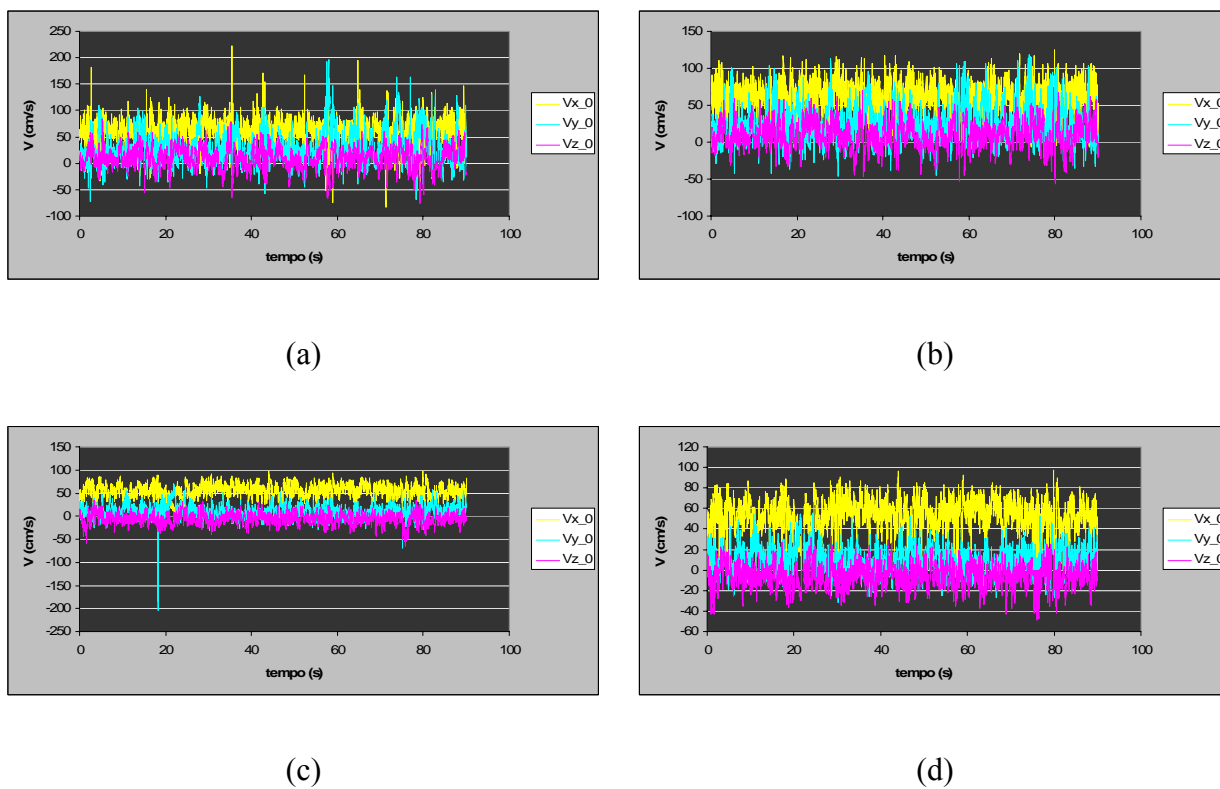


Figura A2.9 – Série de dados (a) ponto 3C, distante 10% h_m do fundo, sem aplicação do filtro; (b) ponto 3C, distante 10% h_m do fundo com filtro PSTM; (c) ponto 3C, distante 80% h_m do fundo, sem aplicação do filtro; (d) ponto 3C, distante 80% h_m do fundo com filtro PSTM

A2.4 Configuração Utilizada nos Ensaios

A partir do exposto neste anexo, a Tabela A2.4 apresenta uma comparação entre as características dos dois velocímetros e mostra os parâmetros adotados para a realização dos ensaios, após essa avaliação inicial.

Tabela A2.4: Resumo das características e parâmetros utilizados nos ensaios para os velocímetros Doppler: Nortek e Sontek.

| | Nortek | Sontek |
|-----------------------------|---|---|
| Volume de medição | Cubo – aresta = 9 mm $0,7 \text{ cm}^3$ | Cilindro - Diâmetro = 6 mm; altura = 9 mm – $0,3 \text{ cm}^3$ |
| Deteção do fundo | Até 25 cm – precisão $\pm 3 \text{ mm}$ | Até 25 cm – precisão $\pm 1 \text{ mm}$ |
| Faixa de velocidade nominal | $\pm 250 \text{ cm/s}$ | $\pm 250 \text{ cm/s}$ |
| Frequência de aquisição | 25 Hz | 50 Hz |
| Tempo de aquisição | 90 s | 90 s |
| Filtro utilizado | PSTM | PSTM |

Anexo 3: Avaliação da Influência do Comprimento da Conexão Tomada-transdutor

Como não foi possível a montagem direta do transdutor de pressão faceado ao fundo do canal, procurou-se avaliar a influência do comprimento das conexões entre os transdutores e as tomadas de medição na avaliação das pressões e das flutuações de pressão.

Foram escolhidas três tomadas de pressão para essa avaliação, conforme pode ser observado na Figura A3.1. Realizaram-se ensaios nas mesmas condições descritas anteriormente (frequência = 50 Hz e duração de amostragem = 360 s), com condutos de diferentes comprimentos: 0,6; 3; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 150 e 200 cm. Analisando as pressões médias (Figura A3.2), observa-se que a variação desses valores encontra-se dentro da faixa de erro do instrumento ($\pm 3,5$ mm). Ou seja, para os comprimentos analisados, não se observou variação na avaliação do valor de pressão média.

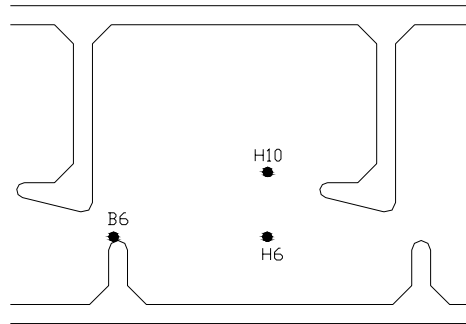


Figura A3.1 – Localização dos pontos onde foram realizados testes para avaliar a influência do comprimento da conexão transdutor-tomada.

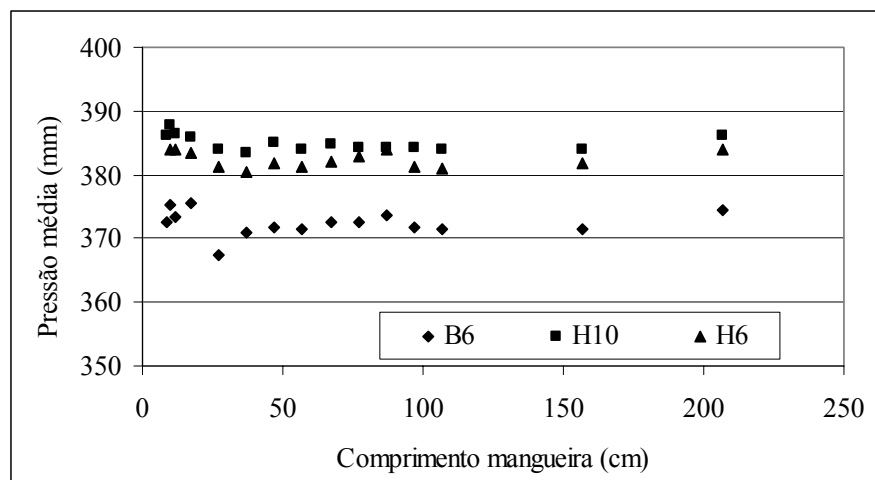


Figura A3.2 – Pressão média para os diferentes comprimentos de mangueiras utilizadas.

Observando os valores de coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e desvio padrão, não se verifica nenhum tipo de variação destas em função do comprimento do conduto. Ao analisar a amplitude dos sinais, pode-se verificar que esta diminui com o aumento do tamanho do comprimento da mangueira, como se pode verificar na Figura A3.3, principalmente para comprimentos maiores que 50 cm.

A Figura A3.4 mostra os espectros de potência obtidos com os diferentes tamanhos de condutos para um dos pontos analisados. Pode-se observar que ocorre uma mudança no comportamento do espectro a medida que o comprimento aumenta. A partir da observação desse comportamento e do obtido para os outros dois pontos analisados, optou-se pela utilização de um conduto de ligação com 20 cm de comprimento, onde o comportamento espectral não apresenta grande alteração em relação ao conduto de menor comprimento. Não se utilizou um comprimento menor com o intuito de facilitar o processo experimental.

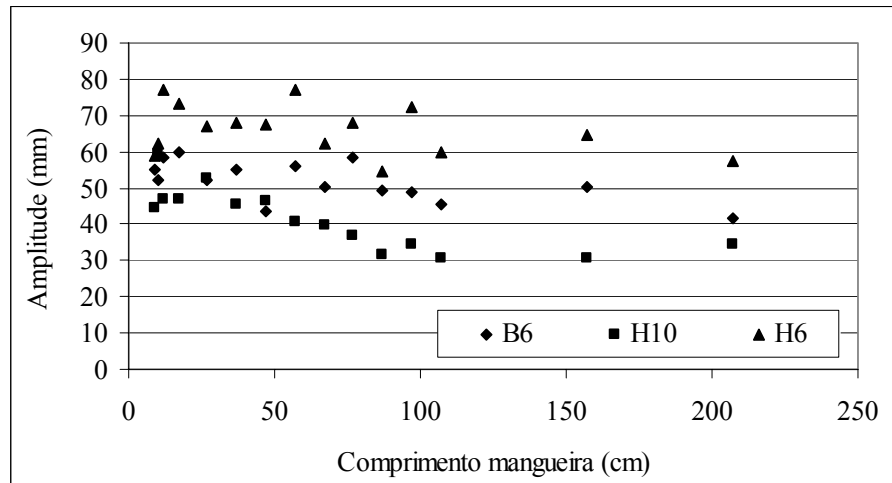


Figura A3.3 – Variação da amplitude dos valores de pressão com o comprimento da mangueira.

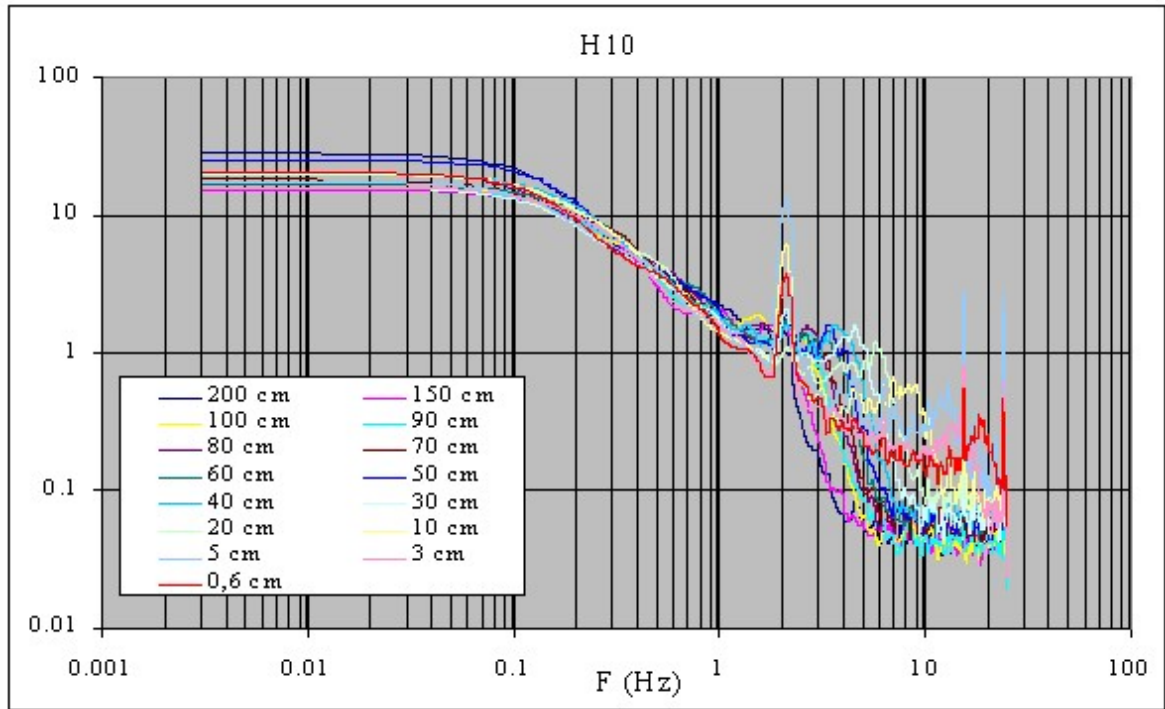
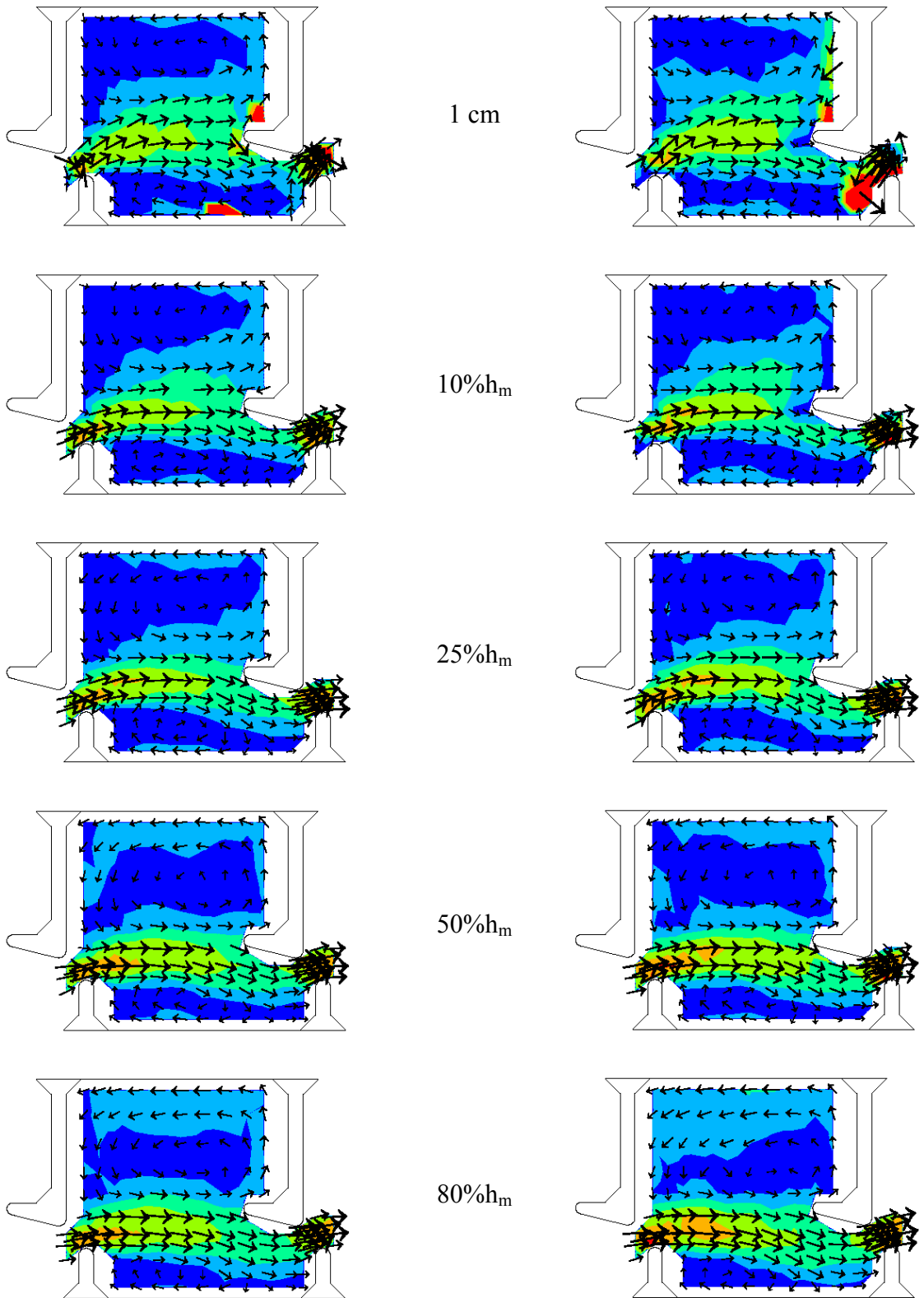


Figura A3.4 – Espectros de potência obtidos no ponto H10, comparando diferentes comprimentos de condutos de ligação entre a tomada de pressão e o transdutor.

Anexo 4: Campos de Velocidades Médias Adimensionalizadas ($V_{xy}/\sqrt{2g\Delta h}$)



$Q = 0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$

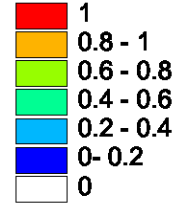
(legenda na página seguinte)

Escada para peixes com ranhura vertical

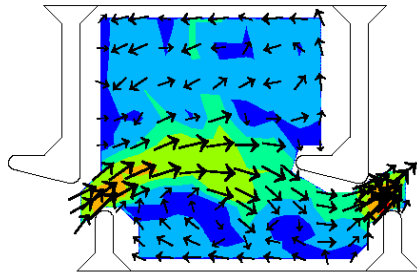
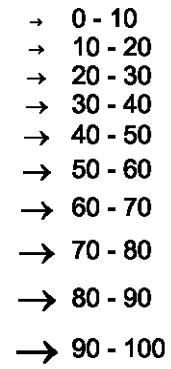
Velocidades adimensionalizadas

$$(V/\sqrt{2g\Delta h})$$

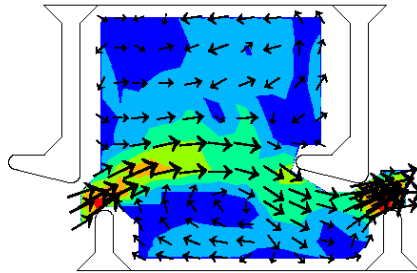
[]



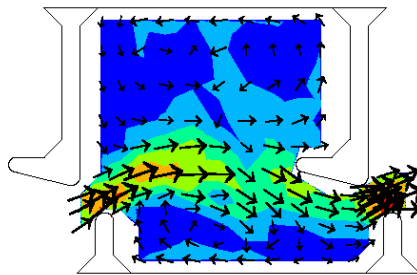
Velocidades (cm/s)



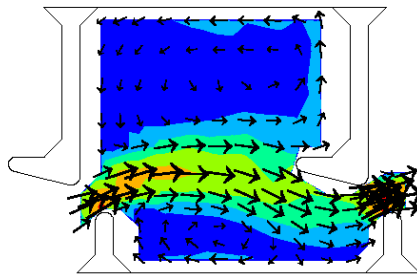
1 cm



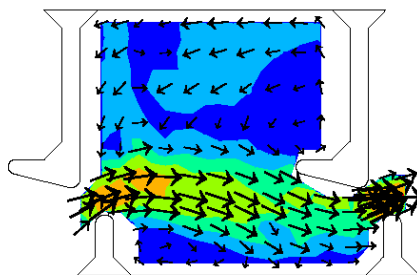
10%h_m



25%h_m



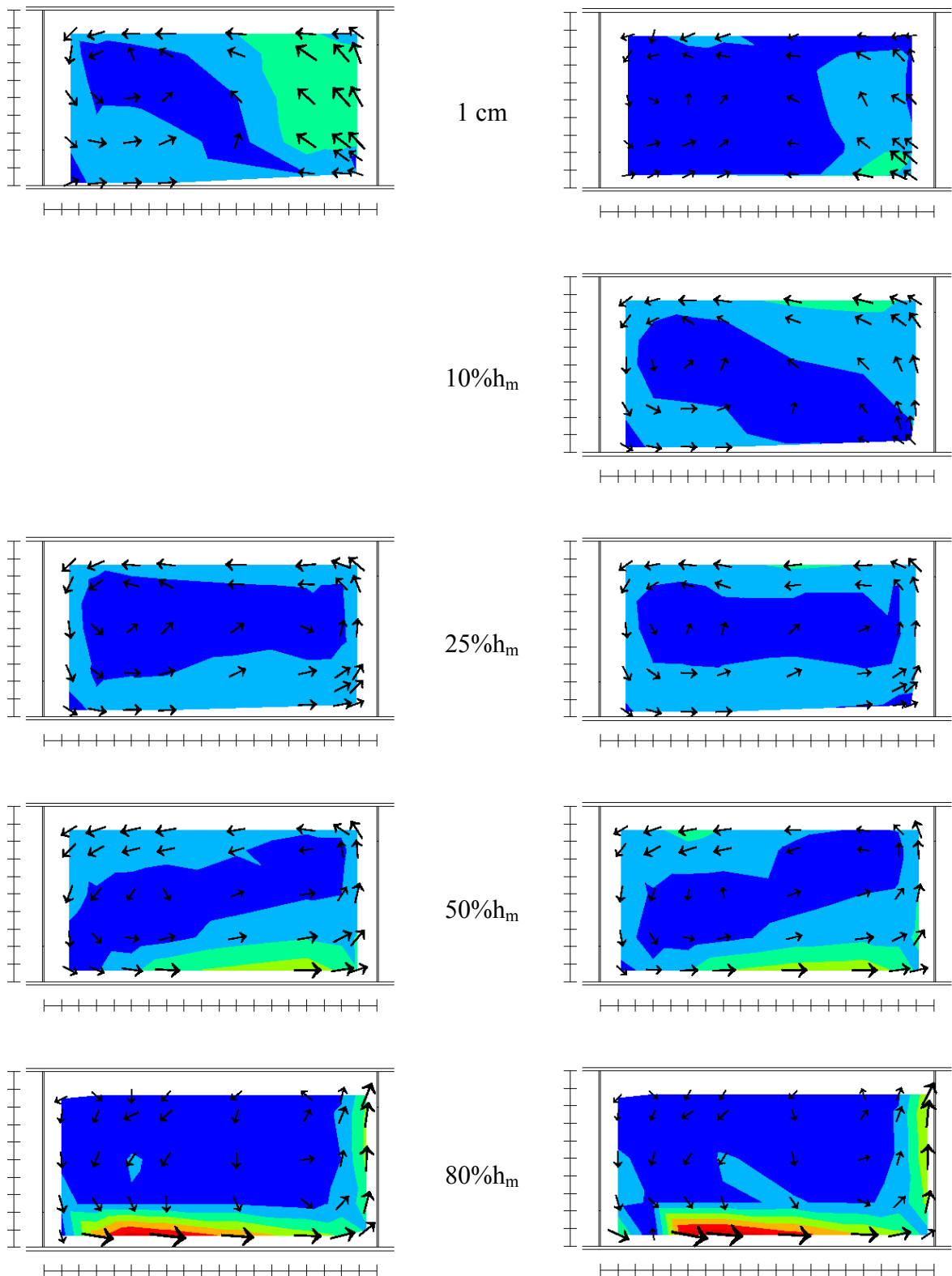
50%h_m



80%h_m

$$Q = 0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$$

Campos de velocidade média adimensionalizados ($V_{xy}/\sqrt{2g\Delta h}$)

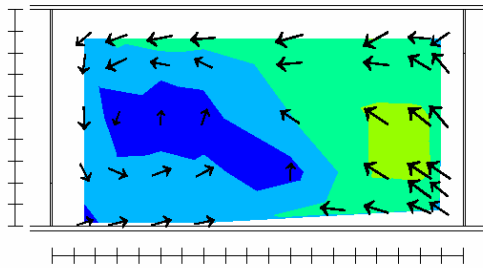


$Q = 0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$

(legenda na página seguinte)

Escada para peixes com descarregador de superfície

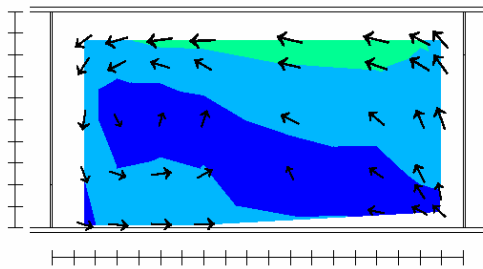


1 cm

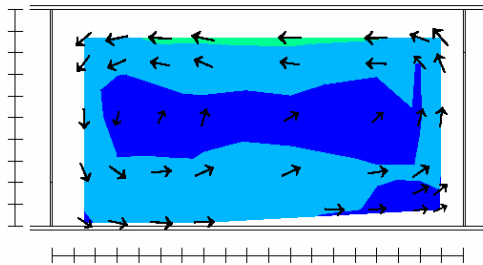
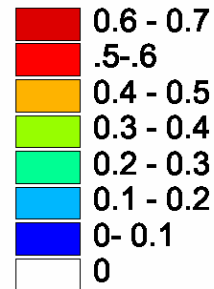
Velocidades adimensionalizadas

$$(V/\sqrt{2g\Delta h})$$

[]

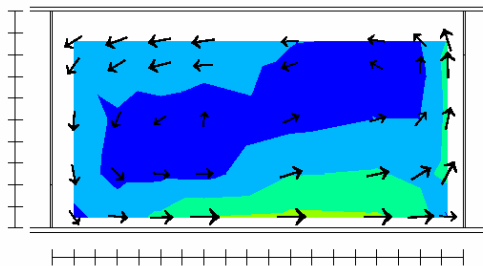
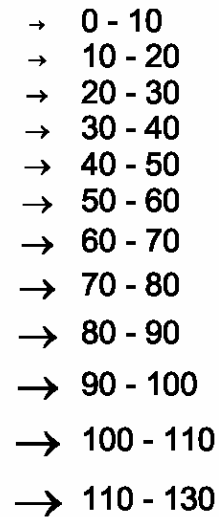


10%h_m

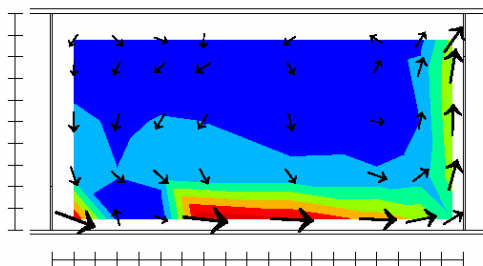


25%h_m

Velocidades (cm/s)



50%h_m

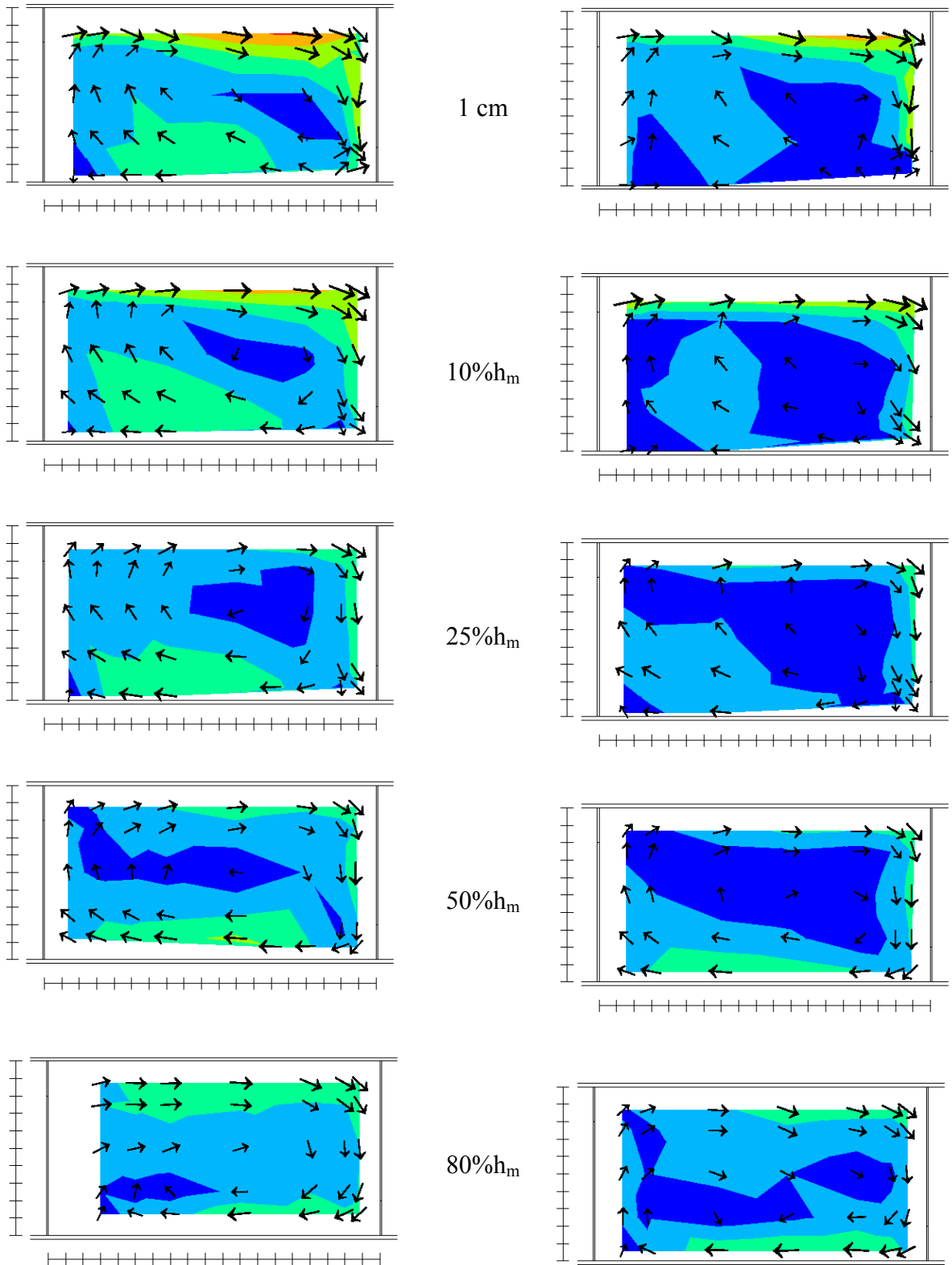


80%h_m

O mapa para a descarga $Q = 0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$ no plano situado a 10%h_m do fundo, não foi apresentado por falhas no sistema de armazenamento das informações.

$Q = 0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$

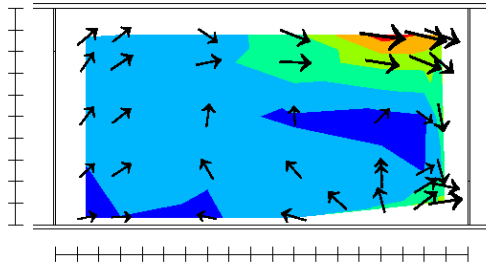
Campos de velocidade média adimensionalizados ($V_{xy}/\sqrt{2g\Delta h}$)



$Q = 0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$

(legenda na página seguinte)



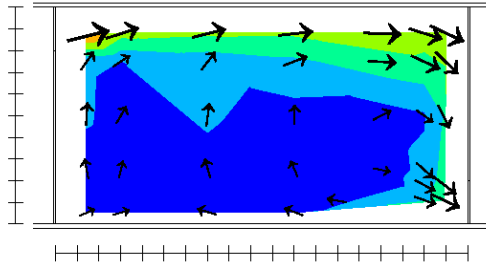
1 cm

Escada para peixes com orifício de fundo

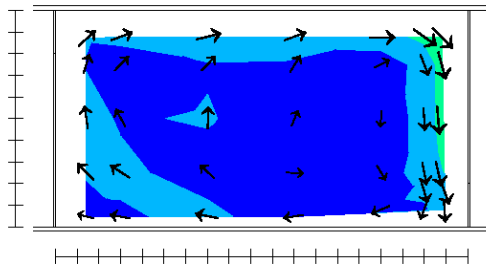
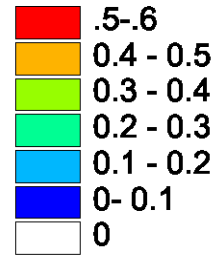
Velocidades adimensionalizadas

$$(V / \sqrt{2g\Delta h})$$

[]



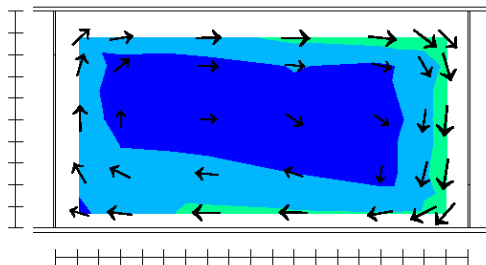
10%h_m



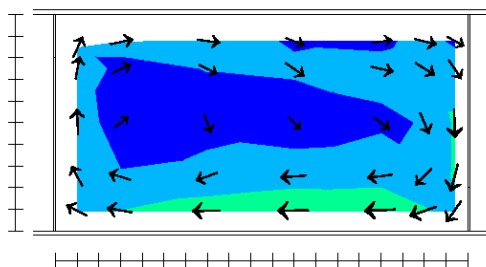
25%h_m

Velocidades (cm/s)

- 0 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 110



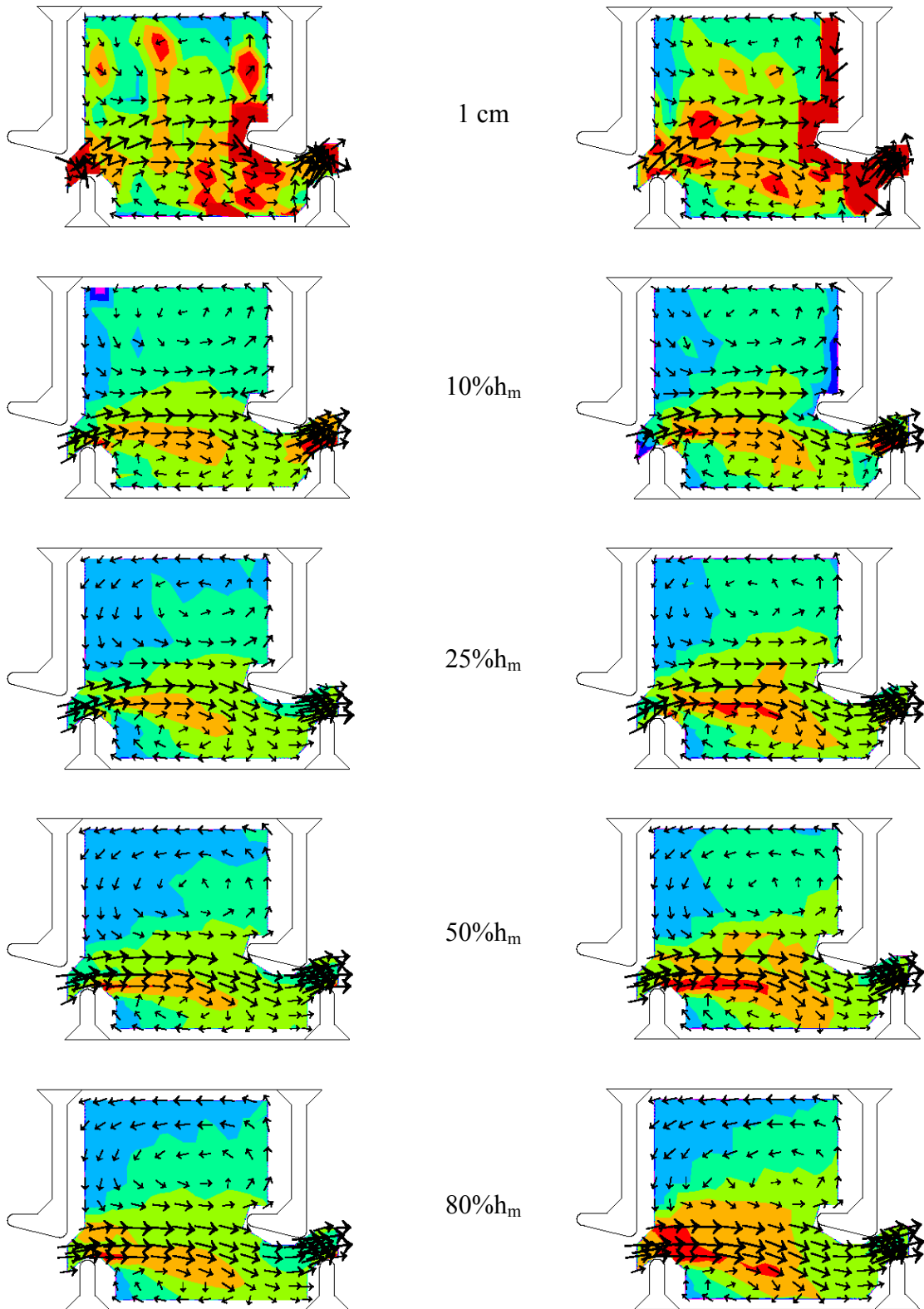
50%h_m



80%h_m

$$Q = 0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$$

Anexo 5: Campos de Energia Cinética da Turbulência Adimensionalizada ($k^{0,5}/V_p$)



$Q = 0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$

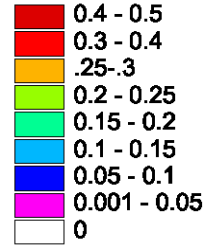
$Q = 0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$

(legenda na página seguinte)

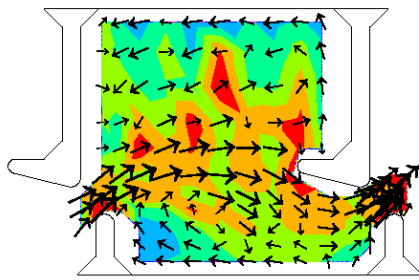
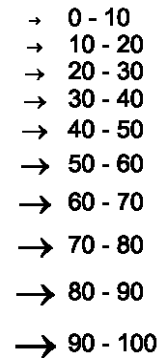
Escada para peixes com ranhura vertical

Energia cinética da turbulência adimensionalizadas

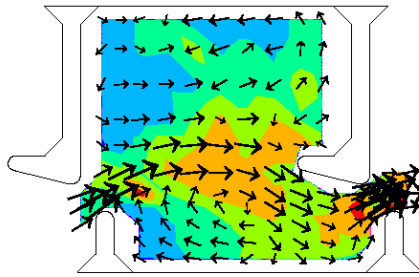
[]



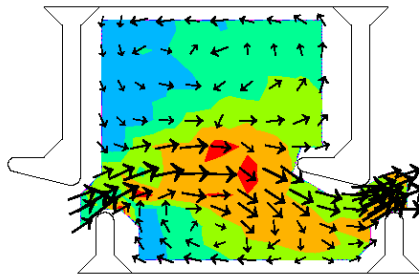
Velocidades (cm/s)



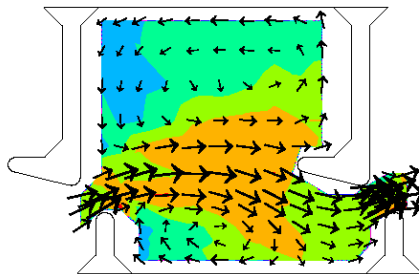
1 cm



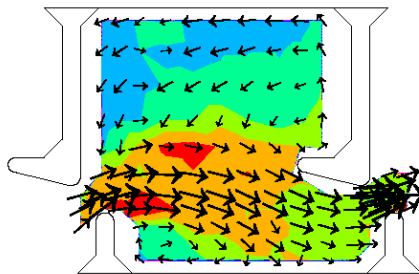
10%h_m



25%h_m



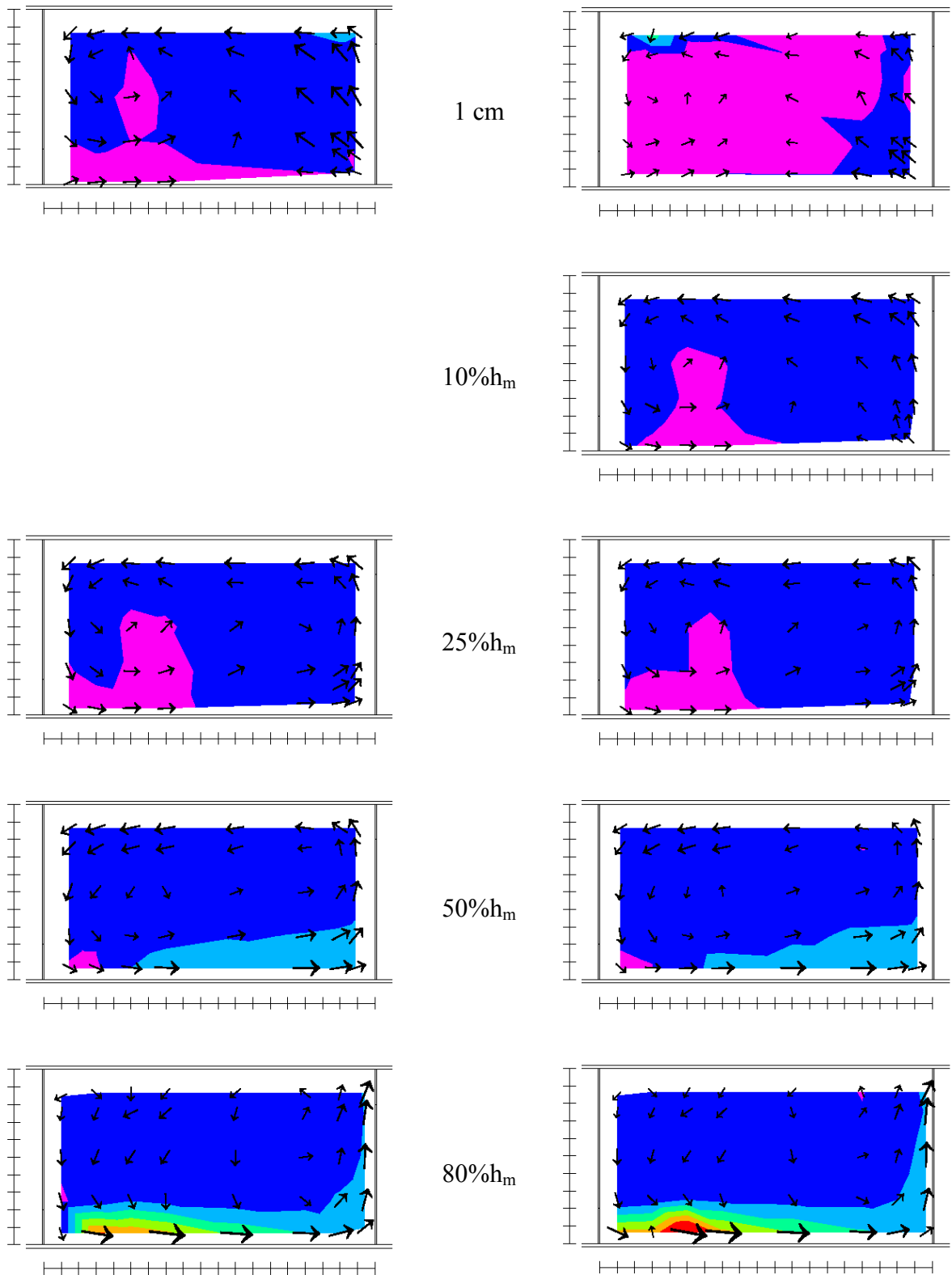
50%h_m



80%h_m

$Q = 0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$

Campos de energia cinética da turbulência adimensionalizada ($k^{0,5}/V_p$)



$Q = 0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$

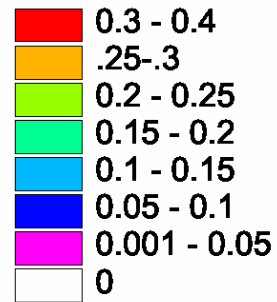
$Q = 0,0410 \text{ m}^3/\text{s}$

(legenda na página seguinte)

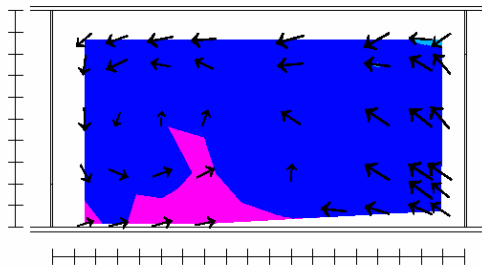
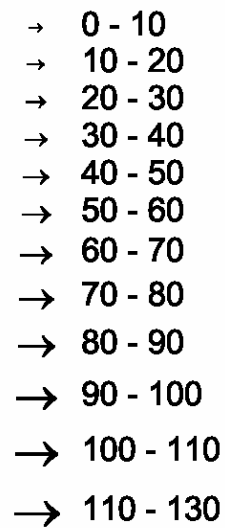
Escada para peixes com descarregador de superfície

Energia cinética da turbulência adimensionalizadas

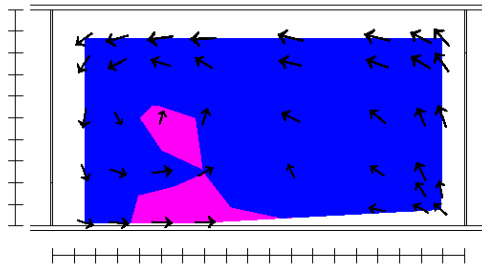
[]



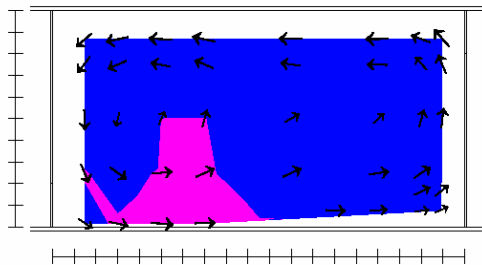
Velocidades (cm/s)



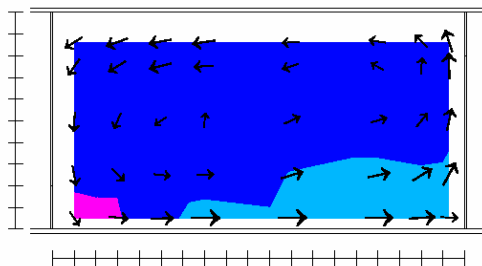
1 cm



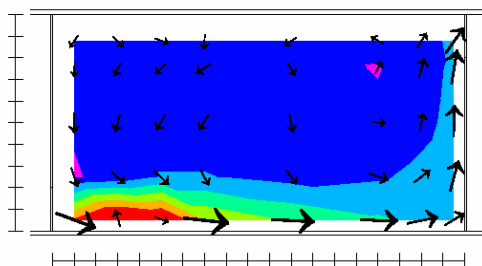
10%h_m



25%h_m



50%h_m

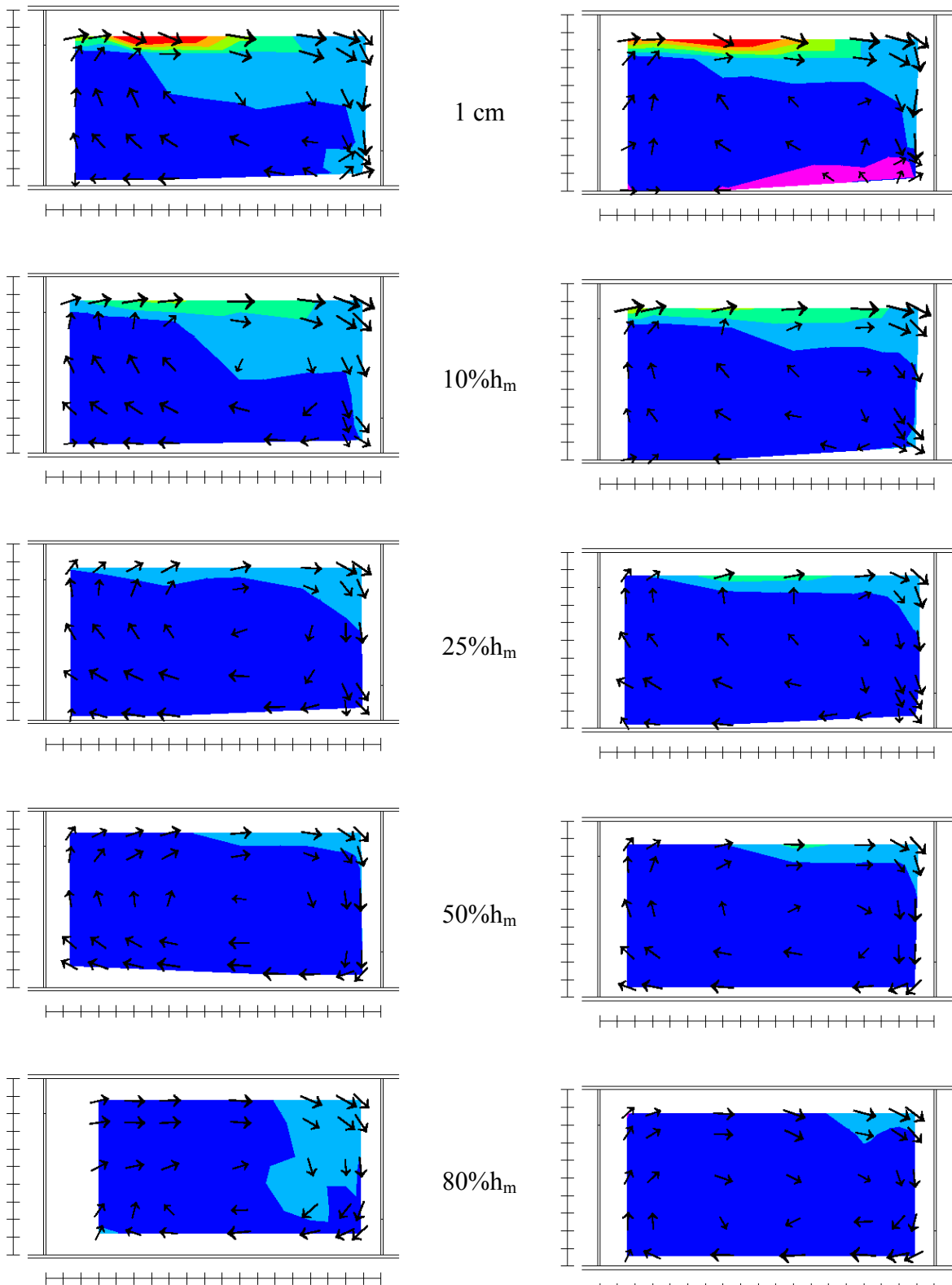


80%h_m

Q = 0,0456 m³/s

O mapa para a descarga Q = 0,0368 m³/s no plano situado a 10%hm do fundo, não foi apresentado por falhas no sistema de armazenamento das informações.

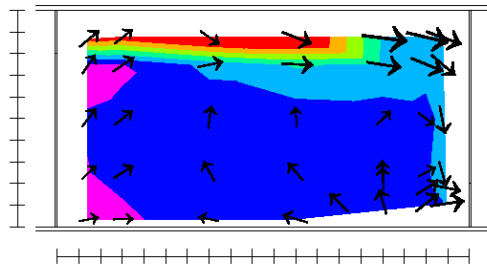
Campos de energia cinética da turbulência adimensionalizada ($k^{0,5}/V_p$)



$Q = 0,0365 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$

(legenda na página seguinte)

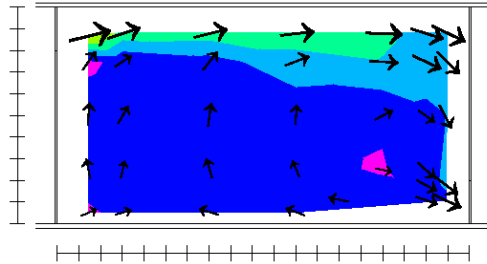


1 cm

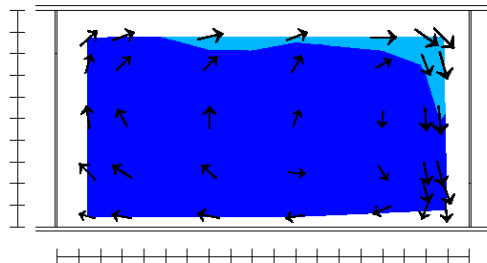
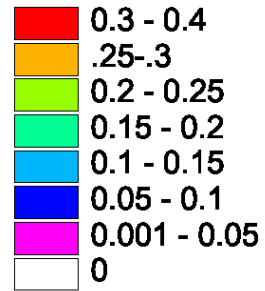
Escada para peixes com orifício de fundo

Energia cinética da turbulência adimensionalizadas

[]

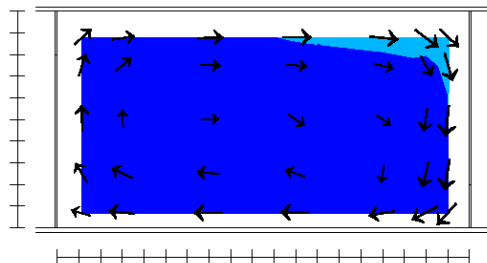
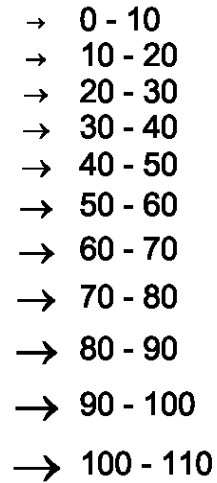


10% h_m

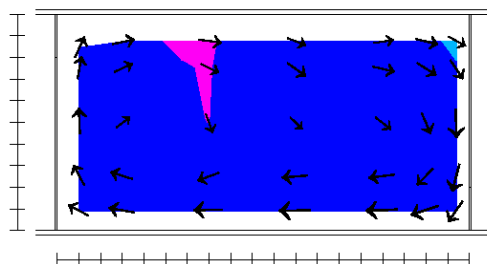


25% h_m

Velocidades (cm/s)



50% h_m



80% h_m

$Q = 0,0456 \text{ m}^3/\text{s}$