

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

“CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO AO LONGO DE
UMA ESCADA DE PEIXES DO TIPO RANHURA VERTICAL”

Dissertação de Mestrado

JANAINE ZANELLA COLETTI

Porto Alegre, Março de 2005.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

**“CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO AO LONGO DE UMA ESCADA
DE PEIXES DO TIPO RANHURA VERTICAL”**

Janaine Zanella Coletti

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

Trabalho desenvolvido sob a orientação do Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e co-orientado pela Prof.a. Dra. Edith Beatriz Schettini, da mesma universidade.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez
Dr. pela Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. José Carlos Cesar Amorim
Dr. pela Institut National Polytechnique de Grenoble

Prof. Dr. Luis Augusto Magalhães Endres
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, Março de 2005.

Resumo

Sucessivos barramentos ao longo de um rio impedem a migração, fenômeno característico de algumas espécies de peixes. Essa interrupção pode provocar a extinção local de espécies migratórias de peixes e acentuada queda da produção pesqueira. Mecanismos de Transposição para Peixes (MTP) são estruturas capazes de mitigar os efeitos negativos desses barramentos, possibilitando a transposição segura dessas espécies através dos barramentos.

Esta pesquisa visou a compreensão do funcionamento de um MTP conhecido como escada para peixes do tipo ranhura vertical. Para tanto, foram realizados experimentos em uma estrutura de laboratório, geometricamente semelhante à Escada de Peixes do tipo Ranhura Vertical do reservatório da UHE de Igarapava/MG.

Foram realizados experimentos em diversas vazões para a verificação do regime de escoamento ao longo da estrutura e para a determinação dos parâmetros hidráulicos de vazão adimensional, de coeficiente de descarga e de coeficiente de cisalhamento, que foram comparados aos encontrados na bibliografia. Por meio desses ensaios foi possível sugerir equações simplificadas para esses parâmetros.

Também foram executados ensaios a vazão constante para gerar mapas de distribuição de velocidades médias e de pressões dentro de um tanque da estrutura. A vazão constante também foram medidos valores de altura de lâmina d'água ao longo de dois eixos de um tanque e realizadas visualizações do escoamento por meio do uso de traçadores.

Os resultados puderam demonstrar a existência de um jato e de duas zonas de recirculação de água, à esquerda e à direita do tanque, assim como a alta variação de valores de pressões no jato e a existência de velocidades no sentido vertical, principalmente na zona de recirculação à esquerda do tanque.

Palavras chaves: mecanismos de transposição para peixes, escada de peixes do tipo ranhura vertical.

Abstract

Successive dams along a river prevent migration, a typical phenomenon of some kinds of fish. This interruption can provoke the local extinction of some migratory fish species and the decay of fish production. Fish by-passes are structures capable to mitigate the negative effects of these dams, allowing this endangered species to safely cross over through these dams.

The research objective is to understand how a special kind of fish by pass operates, known as fishway. In order to achieve this understanding, experiments were made in a laboratory structure, similar to the fishway of Iguarapava Power Plant (MG).

Some tests with several discharges were accomplished to verify the flow along the structure and to determine hydraulic parameters of dimensionless discharge, discharge coefficient and shear coefficient. The results obtained were compared with the bibliography. Through these tests it was possible to suggest some simplified equations for these parameters.

Tests with constant discharges were executed to generate distribution maps with average velocity and pressure inside a pool. Some measurements were also made to evaluate water depth measurements with constant flow along two directions of a pool. Also the visualization of the flow was accomplished by the use of dots which follow the flow.

The results demonstrate the existence of a jet and of two zones of water recirculation, to the left and right side of the pool, as well as high variation of pressure values of the jet and the existence of velocities in the vertical sense, mainly in the recirculation zone left to the pool.

Key words: fish by-pass, fishway, vertical slots.

À minha família, com todo o meu amor.

Agradecimentos

Aos orientadores e mestres Marcelo Giulian Marques e Edith Beatriz Schettini, pela experiência repassada e até mesmo pelas discordâncias;

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudos;

Ao Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais, pela concessão de dados de protótipo;

Aos técnicos Maximiliano Pasqualotti Messa e Sérgio Nicolau Flôres;

Aos bolsistas Emanuele Amanda Gauer e Henrique Furlanetto Mendes;

Aos colegas do Pavilhão Marítimo, em especial às colegas de sala: Daniela Guzzon Sanagiotto, Cristiane Collet Battiston, Emanuele Amanda Gauer e Natália Baccardatz Simmari.

Aos meus familiares, pela compreensão e apoio.

Índice

1	Introdução	1
2	Objetivos	3
3	Revisão Bibliográfica	5
3.1	Migração	5
3.2	Mecanismos de Transposição para Peixes	13
3.2.1	Mecanismos de Transposição para Peixes do tipo Elevadores	18
3.2.2	Mecanismos de Transposição para Peixes do tipo Eclusas	19
3.2.3	Mecanismos de Transposição para Peixes do tipo Escadas	19
	3.2.3.1 Escadas tipo Denil	25
	3.2.3.2 Escadas tipo Piscina Vertedouro	28
	3.2.3.3 Escadas tipo Canal Natural	34
	3.2.3.4 Escadas tipo Ranhura Vertical	35
4	Metodologia	46
4.3	Características do protótipo	46
4.4	Características do modelo reduzido	47
4.5	Ensaio Experimentais	51
4.5.1	Ensaio tipo A – Mapeamento de características do escoamento	51
	4.5.1.1 Condição de operação para o ensaio Tipo A	51
	4.5.1.2 Visualização do escoamento	53
	4.5.1.3 Aquisição dos dados de velocidade média	53
	4.5.1.4 Aquisição dos dados de pressão	58
	4.5.1.5 Aquisição dos dados de nível e lâmina d'água	61
4.5.2	Ensaio tipo B – Cálculo de diferentes parâmetros hidráulicos	63
	4.5.2.1 Condição de operação para o ensaio Tipo B	64
5	Análise dos Resultados	65
5.1	Verificação do Escoamento Uniforme	65
5.2	Ensaio tipo A	65
	5.2.1. Visualização do escoamento	65
	5.2.2 Velocidade Média	67
	5.2.3 Pressões no fundo do tanque	80
	5.2.4 Velocidade associada à pressão	82
	5.2.5 Altura d'água	84
5.3	Ensaio tipo B	85
	5.3.1 Verificação de escoamento subcrítico ou supercrítico	85
	5.3.2 Vazão Adimensional	87
	5.3.3 Coeficiente de Cisalhamento (C_f)	89
	5.3.4 Coeficiente de Descarga (C_d)	91
6	Conclusões	94
7	Recomendações	97
8	Referências Bibliográficas	98

Índice de Tabelas

Tabela 3.1. Equações de descarga adimensional para os dois tipos de escoamento em escadas do tipo piscina vertedouro.	31
Tabela 3.2. Resumo das vazões adimensionais para uma configuração padrão de escada tipo piscina vertedouro com orifício.	33
Tabela 4.1. Variáveis de projeto esperadas para a estrutura de Igarapava.	46
Tabela 4.2. Resumo das características físicas do modelo experimental e do protótipo.	48
Tabela 4.3. Variáveis de projeto correspondentes à estrutura de Igarapava no modelo em escala 1:20.	51
Tabela 4.4. Condição de operação descrita por Viana (2005). Valores para o protótipo e sua relação para o modelo (escala 1:20).	52
Tabela 5.1. Velocidades médias máximas encontradas na ranhura.	76
Tabela 5.2. Velocidades médias máximas encontradas no tanque.	77
Tabela 5.3. Resumo das características do modelo e protótipo do presente estudo e do modelo de Rajaratnam et al. (1986).	87

Índice de Figuras

Figura 3.1. Tipo de movimentação de algumas classes migratórias. Fonte: Martins (2000), adaptado.	6
Figura 3.2. Valor médio de Velocidade crítica para a espécie <i>Pimelodus Maculatus</i> (Santos, 2004).	10
Figura 3.3. Algumas espécies com características migratórias encontradas no Brasil.	2
Figura 3.4. Defletores ("Flip Lips") para diminuir a Estrada de ar no escoamento sobre vertedouros.	16
Figura 3.5. Tela de proteção na tomada d'água e canal para passagem segura	16
Figura 3.6. Representação de um elevador para peixes.	18
Figura 3.7. Representação de uma eclusa para peixes.	19
Figura 3.8. Escada do tipo piscina vertedouro da Barragem de John Day, no rio Columbia.	20
Figura 3.9. Resultado da avaliação da qualidade das passagens para peixes em Portugal.	23
Figura 3.10. Principais problemas relativos ao funcionamento de escadas para peixes em Portugal.	23
Figura 3.11. Posicionamento adequado da entrada da escada em relação ao vertedouro.	24
Figura 3.12. (a) Foto de um canal de ictiofauna do tipo Denil, (b) vista lateral e (c) vista frontal de dois tipos de septo.	25
Figura 3.13. Padrão de circulação da água para escada tipo Denil.	26
Figura 3.14. Escada de Peixes do tipo Piscina Vertedouro com orifício. Barragem Clunie, Escócia.	29
Figura 3.15. Perfil da linha d'água e padrão de circulação para escoamento sobre vertedouros livres ("plunging flow") (Katopodis, 1992 e Larinier, 2002).	30

- Figura 3.16. Perfil da linha d'água e padrão de circulação para escoamento sobre 30 vertedouros submersos ("streaming flow") (Katopodis, 1992 e Larinier, 2002).
- Figura 3.17. Detalhe de vertedouro dotado de orifício retangular. 33
- Figura 3.18. Escada de peixes do tipo Canal Natural da Barragem de Itaipu, formada por 35 obstruções a espaçamentos sucessivos: (a) vista aérea e (b) detalhe do canal.
- Figura 3.19. Escada de peixes do tipo Canal Natural em Bandon Grove, no Rio Williams, 35 Austrália.
- Figura 3.20. Foto de um canal de transposição do tipo Ranhura Vertical, mostrando os 36 pares sucessivos de septos e as piscinas decorrentes deles. Barragem de Mauzac, no Rio Dordogne (França).
- Figura 3.21. Representação de escoamento uniforme em uma escada de peixes do tipo 38 ranhura vertical.
- Figura 3.22. Representação dos modelos de ranhuras estudadas por Rajaratnam et 39 al.(1986) e do padrão de circulação da água que cada um deles forma.
- Figura 3.23. Representação das forças envolvidas em um escoamento uniforme. 39
- Figura 3.24. Representação simplificada do padrão de circulação (Rajaratnam et al., 43 1986).
- Figura 3.25. Mapeamento de velocidades médias para 10cm abaixo da linha d'água 44 (Viana, 2003).
- Figura 4.1. Vista aérea da escada para peixes da UHE Igarapava. 47
- Figura 4.2. Representação simplificada do modelo. 49
- Figura 4.3. Foto do modelo com detalhe da entrada e do reservatório superior. 49
- Figura 4.4. Fotografia mostrando as dimensões dos septos. 50
- Figura 4.5. Posicionamento horizontal dos pontos de aquisição de velocidade média. 54
- Figura 4.6. Planos de aquisição de dados de velocidade média. 54

Figura 4.7. Micromolinete, registrador de dados e microprocessador utilizados nos ensaios de velocidade média.	55
Figura 4.8. Variação dos valores de velocidade média para diferentes tamanhos de amostras (a) em um ponto próximo ao jato e (b) em um ponto próximo ao centro do tanque e faixa mostrando a precisão do instrumento.	56
Figura 4.9. Representação do conceito de camada limite.	57
Figura 4.10. Fotos representando a seqüência para aquisição dos dados de pressão.	59
Figura 4.11. Representação do aferidor de transdutores.	59
Figura 4.12. Foto do mural para leitura dos piezômetros.	60
Figura 4.13. Posicionamento dos pontos de aquisição de pressão dentro do tanque.	60
Figura 4.14. Variabilidade na leitura de valores de altura d'água com régua.	61
Figura 4.15. Variabilidade na leitura de valores de altura d'água com ponta linimétrica.	62
Figura 4.16. Linhas de aquisição dos dados de altura d'água.	62
Figura 4.17. Foto da ponta linimétrica usada no experimento.	62
Figura 4.18. Representação das alturas y_u e y_d .	63
Figura 5.1(a). Gráfico em 3 dimensões das linhas de corrente do traçador no tanque de controle e a trajetória vista em planta e em perfil.	66
Figura 5.1(b). Gráfico em 3 dimensões das linhas de corrente do traçador na direção do jato e a trajetória vista em planta e em perfil.	67
Figura 5.2. Representação do movimento d'água dentro de um tanque sobre uma fotografia do modelo estudado.	68
Figura 5.3. Campo de velocidades médias a 2 cm (0,40 m no protótipo) do fundo do canal.	69
Figura 5.4. Campo de velocidades médias a 4 cm (0,80 m no protótipo) do fundo do canal.	69

Figura 5.5. Campo de velocidades médias a 6 cm (1,2 m no protótipo) do fundo do canal.	69
Figura 5.6. Posição dos pontos no eixo principal do jato.	70
Figura 5.7. Perfil de velocidades médias ao longo do eixo longitudinal principal do tanque e o detalhamento da variação de velocidade para cada um dos planos.	71
Figura 5.8. Campo de velocidades médias, correspondente a 0,40 m do fundo canal do protótipo, obtido no modelo (a 2 cm do fundo do canal), com valores de velocidade referentes ao protótipo.	73
Figura 5.9. Campo de velocidades médias a 0,40 m (2 cm em modelo) do fundo do canal do protótipo.	73
Figura 5.10. Campo de velocidades médias, correspondente a 0,80 m do fundo canal do protótipo, obtido no modelo (a 4 cm do fundo do canal), com valores de velocidade referentes ao protótipo	74
Figura 5.11. Campo de velocidades médias a 0,80 m (4 cm em modelo) do fundo do canal do protótipo.	74
Figura 5.12. Campo de velocidades médias, correspondente a 1,20 m do fundo canal do protótipo, obtido no modelo (a 6 cm do fundo do canal), com valores de velocidade referentes ao protótipo.	75
Figura 5.13. Campo de velocidades médias a 1,20 m (6 cm em modelo) do fundo do canal do protótipo.	75
Figura 5.14. Velocidades médias máximas encontradas na ranhura.	78
Figura 5.15. Velocidades médias máximas encontradas no tanque.	78
Figura 5.16. Distribuição de Pressões Médias.	80
Figura 5.17. Desvio padrão de pressões.	81
Figura 5.18. Flutuação relativa de pressões.	81
Figura 5.19. Distribuição de velocidades médias e a distribuição de pressões.	83

- Figura 5.20. Distribuição de velocidades médias e o desvio padrão de pressões. 83
- Figura 5.21. Distribuição de velocidades médias e a flutuação relativa de pressões. 83
- Figura 5.22. Alturas d'água ao longo de um eixo longitudinal ao tanque. 84
- Figura 5.23. Alturas d'água ao longo de um eixo transversal ao tanque. 85
- Figura 5.25. Relações entre os parâmetros Q_* e y_0/b_0 encontradas na literatura e a sugerida neste estudo. 89
- Figura 5.26. Valores de C_f calculados a partir da Equação 3.22 e a Equação 5.3, ajustada em função de y_0/b_0 . 90
- Figura 5.27. Coeficiente de descarga em função do parâmetro adimensional y_0/b_0 calculado usando-se os dados do presente estudo e os dados experimentais obtidos no estudo de Rajaratnam et al. (1986). 92

Notação

$\bar{\tau}_o$	Tensão cisalhante
λ	Relação entre a dimensão do protótipo e modelo
a	Distância entre ranhuras para uma escada tipo Denil (m)
a_s	Espaço entre as ranhuras para o projeto Denil padrão (0,25m)
B	Largura da escada (m)
b	Abertura do septo Denil (m)
b_s	Abertura do septo para o projeto Denil padrão (0,36m)
b_0	Largura livre do orifício ou ranhura
C_D	Coefficiente de arrasto
C_d	Coefficiente de descarga
C_f	Coefficiente de cisalhamento
d	Espessura da linha d'água sobre o vertedouro submerso (m)
E	Nível de dissipação de energia nos tanques (W/m^3)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
h	Carga hidráulica sobre o vertedouro (m)
L	Comprimento da piscina (m)
MTP	Mecanismos de Transposição para Peixes
p	Altura do vertedouro (m)
Q	Vazão (m^3/s)
Q_p	Vazão para o escoamento em forma de jatos sobre vertedouros (m^3/s)
Q_s	Vazão para o escoamento sobre vertedouros submersos (m^3/s)
Q_t	Vazão adimensional de transição (m^3/s)
Q_w	Vazão sobre o vertedouro (m^3/s)
Q^*	Vazão adimensional
Q_m	Vazões do modelo (m^3/s)
q_m	Vazões específicas modelo
Q_P	Vazões do protótipo (m^3/s)
q_p	Vazões específicas protótipo
r_a	Razão entre a distância das ranhuras e a abertura que há nelas
S_0	Declividade de fundo do canal (m/m)
V	Velocidade característica (m/s)
V_w	Velocidade do escoamento sobre vertedouros submersos (m/s)
V_m	Velocidades modelo

V_p	Velocidades do protótipo
y	Altura da lâmina d'água (m)
\square	Peso específico da água (N/ m ³)
\bar{y}	Profundidade d'água a montante da ranhura (m)
Δ_h	Diferença entre o nível d'água entre duas piscinas adjacentes (m)
y_0	Profundidade média teórica da lâmina d'água para escoamento uniforme (m)
z_0	Altura do orifício (m)
U	Velocidade média de deslocamento do peixe (m/s)
S_t	Número de Strouhal
l	Amplitude do rastro formado pelo peixe (m)
f	Frequência de batimentos da cauda do peixe (Hz)
UHE	Usina Hidrelétrica
K	Altura central do septo para escadas tipo Denil (m)
y_u	Altura da lâmina d'água imediatamente a montante da ranhura (m)
y_d	Altura da lâmina d'água imediatamente a jusante da ranhura (m)

1 Introdução

A ictiofauna tem como particularidade a alta dependência das características do habitat em que vive e em que mantém suas funções biológicas (reprodução, nutrição, locomoção, etc.). Essa dependência é ainda mais marcante em peixes com características migratórias, que requerem diferentes ambientes para as principais fases de seu ciclo de vida, como a desova, produção de alevinos, desenvolvimento de adultos e maturação sexual. Assim, a perpetuação das diferentes espécies de peixes reofílicos está subordinada à dinâmica fluvial (Godoy, 1985).

A necessidade de migração é um fator fundamental a ser considerado quando da construção de uma barragem, visto que ela constitui um obstáculo para os peixes que migram (Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB, 2003). Este obstáculo é um dos principais impactos ambientais causados por barramentos.

No Brasil, diversas são as espécies que usam da migração para atingirem áreas de desova ou de alimentação. O surubim, o dourado, o pacu, o jaú (Martins, 2000), são algumas dessas espécies. No entanto, pouco se sabe sobre esses peixes migratórios, sua capacidade natatória e suas rotas de migração. O que se sabe é que muitas são as espécies que migram e muitas são as espécies que não conseguem se beneficiar dos mecanismos de transposição que já foram construídos no país.

O fato de haver, em um país como o nosso, uma grande diversidade ictiológica, com características e possivelmente com necessidades diferenciadas, faz com que as estruturas de transposição, em especial as escadas, devam ser mais complexas, com a menor seletividade possível, de forma a atender a vasta população de peixes. A maioria dos estudos acerca de obras de transposição é feita em outros países, estudos no Brasil a esse respeito são muito recentes. Assim, é possível imaginar o motivo da ineficiência desse tipo de estrutura, provavelmente por não estarem de acordo com as capacidades ou necessidades da fauna ictiológica local ou por funcionarem de forma muito seletiva, atendendo apenas determinadas espécies, cujas capacidades natatórias estão de acordo com as velocidades da estrutura.

Cada região deve ter o conhecimento necessário de sua ictiofauna para que a estrutura atenda a população de peixes daquele local. O Brasil apresenta uma diversidade muito grande de

peixes e o conhecimento das suas características ainda se encontra na fase inicial, o que torna a investigação experimental árdua e de fundamental importância.

Muitos são os aspectos que podem ser abordados em uma pesquisa sobre ictiofauna. “A velocidade com que os peixes nadam assim como as épocas e os métodos de migração devem ser conhecidos a fim de se poder projetar adequadamente as estruturas para passagens de peixes” (Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB, 2003). Outro item a ser pesquisado deve ser o volume dos cardumes, importante para o correto dimensionamento dos tanques das escadas de peixes (Martins, 2000), além da capacidade natatória, como o experimento realizado por Santos (2004), que testou o tempo com que determinadas espécies suportavam diferentes velocidades.

Sendo os canais de ictiofauna mecanismos cujo processo de transposição de baseia na locomoção do peixe, é de extrema importância que a velocidade do escoamento na estrutura não ultrapasse o valor limite suportado pelo animal (Santos, 2004), o que geraria uma seletividade em termos de espécies capazes de transpor a estrutura. Logo, em canais de migração, variáveis como as distribuições de velocidades, a vazão na entrada do canal, os níveis, as pressões, entre outras, devem ser os principais fatores de estudo, no intuito de gerar conhecimento sobre esse tipo de estrutura.

Um dos exemplos bem sucedidos do uso de MTP é a Escada de Peixes da UHE de Igarapava/MG, que atende uma grande variedade de espécies e tamanhos. Entender o funcionamento dessa estrutura em especial poderá levar a critérios de dimensionamento úteis para os nossos peixes. Assim, a relevância desta pesquisa está no fato de gerar informações a respeito de uma estrutura capaz de transpor várias espécies brasileiras.

2 Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é contribuir para o conhecimento acerca do funcionamento de uma escada para peixes do tipo ranhura vertical. Para tanto, foi usada uma estrutura de laboratório que representa as condições de contorno de um Mecanismo de Transposição para Peixes existente na Usina Hidroelétrica de Igarapava/MG, em escala 1:20, que foi escolhida como protótipo por demonstrar um bom funcionamento no que diz respeito ao uso pela ictiofauna presente naquela região.

Como forma de atingir objetivo principal, foram fixadas as seguintes etapas:

- ◆ Construção da estrutura de laboratório (modelo parcial em escala 1:20) referente à escada para peixes da UHE de Igarapava/MG;
- ◆ Calibração dos equipamentos usados nos ensaios;
- ◆ Desenvolvimento de uma técnica adequada de visualização por meio de traçadores no escoamento;
- ◆ Avaliação do regime de escoamento no modelo por meio do levantamento das alturas de lâmina d'água ao longo dos tanques;
- ◆ Cálculo de três parâmetros hidráulicos (vazão adimensional, coeficiente de descarga e coeficiente de cisalhamento) para o modelo e comparação dos resultados obtidos com os dados da literatura;
- ◆ Mapeamento da distribuição de pressões junto ao fundo e de velocidades em um dos tanques do modelo;
- ◆ Levantamento das alturas de lâmina d'água ao longo de dois eixos de um dos tanques do modelo;
- ◆ Comparação da distribuição de velocidades dentro de um tanque do canal com valores de velocidades encontrados no protótipo por Viana (2005);

◆ Análise da trajetória de um tipo de traçador em um tanque do modelo.

Os dados de protótipo foram concedidos pelo Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais.

3 Revisão Bibliográfica

4.3 Migração

A migração de peixes envolve um completo ciclo de movimentos de jusante e montante. Essa seqüência depende do estágio da vida do animal, sua posição e o tipo de migração. Geralmente a migração a jusante é mais característica nos primeiros estágios de vida, enquanto que a migração a montante é mais característica na vida adulta (Katopodis, 1992).

A migração é um fenômeno complexo, onde muitas são as variáveis envolvidas. Seu estudo inclui aspectos como o conhecimento do habitat, das rotas migratórias, das classes de idade das espécies e da periodicidade durante o ciclo de vida (Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB, 2003). Também o período do dia influencia o movimento migratório, sendo particular de cada espécie o turno do dia de maior migração. Estudos feitos sobre a migração em um canal experimental no hemisfério norte (Rakowitz et al., 2000) mostraram que densidade de peixes é sempre maior durante a noite do que durante o dia, para as espécies pesquisadas.

O Brasil possui uma das mais ricas biodiversidades do planeta e, entre os peixes, também não há exceção. Infelizmente, porém, esta riqueza de espécies ainda não é totalmente conhecida.

No Brasil, muitas são as espécies de peixes que migram, várias delas com diferentes tipos de migração. Essa, por sua vez, pode assumir uma periodicidade que varia entre diária a anual e uma faixa de distâncias que pode variar entre poucos metros a vários quilômetros. Algumas espécies apresentam migração reprodutiva, outras, migração alimentar ou trófica. Ainda existem aquelas que mantêm ambos os tipos. Também existem peixes que vêm do mar para desovar em rios (os anádromos, como o salmão, o robalo, a tainha, a pescada, a dourada, a corvina, e o esturjão) e outros vêm dos rios para desovar no mar (os ditos catádromos, como a enguia) (Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB, 2003). Desta forma, a classificação para peixes migratórios é a seguinte:

- ◆ Diádromos: peixes que migram entre água salgada e água doce, subdivididos em:
 - ◆ Anádromos: peixes que vivem no mar, mas desovam em água doce (como o robalo, a tainha, a pescada, a corvina, o esturjão, alguns cações e arraias, o salmão e a truta);

- ◆ Catádromos: peixes que vivem em água doce, mas desovam no mar (como a enguia européia e americana).
- ◆ Potamódromos: peixes que migram apenas em águas doces (dourado, jaú, pintado, bagre, piraíba, pirarara), constituindo a maioria das espécies migratórias de valor comercial no Brasil.

Peixes que migram dentro do oceano são chamados oceanódromos (Godoy, 1985).

Na Figura 3.1 estão representadas essas classes migratórias.

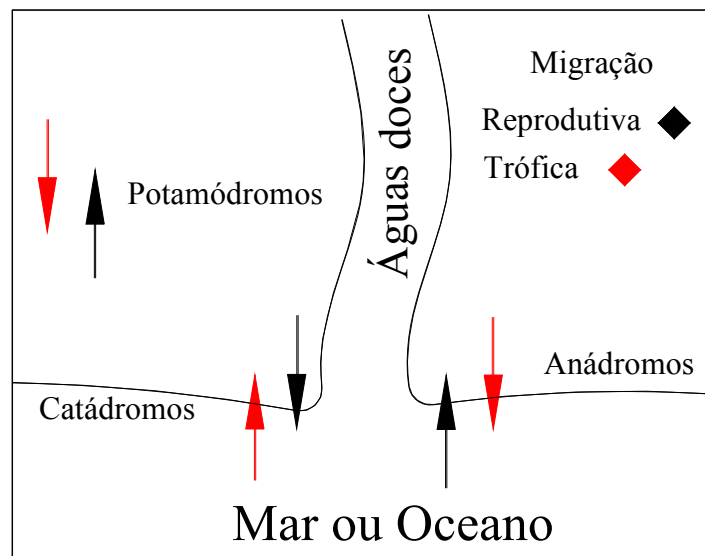


Figura 3.1. Tipo de movimentação de algumas classes migratórias. Fonte Martins (2000), adaptado.

O tipo de migração mais conhecido em nosso país é a piracema, que é a migração reprodutiva ascendente, ou seja, de jusante para montante do rio, local onde liberam e fecundam seus óvulos. Para que a reprodução se dê é necessário que o peixe se movimente e se canse através da migração (piracema), que ocorre apenas uma vez por ano (Godoy, 1985). Entre os peixes de piracema estão o surubim (ou pintado), o dourado, o curimatá, o pacu, o jaú, o ximboré (timboré ou chimboré), a cachara, a jurupoca, e a piramutaba, todos com valor para a pesca (Martins, 2000).

A desova geralmente ocorre nas cabeceiras, após grandes chuvas, quando o nível dos rios sobe, as águas estão turvas e oxigenadas. A oxigenação mais elevada é necessária para

atender essa fase inicial de desenvolvimento do animal e as águas turvas impedem a visualização dos ovos e larvas pelos predadores. Este período é denominado defeso ou de procriação e coincide com o período chuvoso, respectivamente de novembro a fevereiro. Nessa época podem ser formados cardumes de 100.000 a 160.000 indivíduos, numa proporção de um macho para cada fêmea. Muitos peixes brasileiros migram cronologicamente de modo regular, sendo apanhados um ano depois no mesmo local e hora de marcação, mostrando um ritmo e periodicidade migratória (Godoy, 1985).

Inicialmente desovam os peixes de escama (curimatá, pacu, dourado, etc.) e então os peixes de couro (pintado, cachara, jurupensém, jurupoca, etc.). Essa seqüência tem lógica, na medida em que as larvas de peixes de couro são predadoras e necessitam encontrar larvas de outros peixes para se alimentarem (Martins, 2000).

A desova desses peixes reofílicos só se realiza quando o nível do rio está em ascensão, jamais quando está estável ou em declínio. Isso porque, com as cheias, o rio extravasa e forma lagoas marginais, para onde são levados os milhares de ovos pela correnteza. Assim, para a desova, os peixes reofílicos dependem da dinâmica do meio (águas correntes e em elevação quanto ao nível), mas, para a incubação, dependem das águas estáticas das lagoas marginais. (Godoy, 1985).

Os peixes fluviais da bacia superior do Rio Paraná, durante uma época do ano (de fevereiro a setembro, aproximadamente), alimentam-se bastante e acumulam reservas de proteínas e gorduras. Depois, quando chega a época de reprodução, sobem os rios. Só irão se alimentar de novo após desova, que se realiza, geralmente entre os meses de novembro a fevereiro de todos os anos. A fadiga migratória é importante para a produção de uma cadeia de fenômenos fisiológicos, a partir da qual são produzidos os hormônios que estimulam o desenvolvimento dos órgãos sexuais (Godoy, 1985).

“Existem duas causas ou razões principais sobre a Piracema que podem ser explicadas do ponto de vista fisiológico e biológico. Em primeiro lugar... é que o fato dos peixes ficarem nadando contra a correnteza, muitas vezes até parados frente às corredeiras, faz com que haja uma alta produção de ácido láctico pela musculatura do peixe. Durante o processo de metabolização (queima) deste ácido láctico, no processo natural, parte é transformado em CO₂ e parte em ácido carbônico (eliminados do organismo pela respiração). Porém, parte deste ácido láctico produzido não é metabolizado, e é responsável pelo estímulo da região anterior

da Hipófise (glândula responsável pela produção de hormônios que promovem a maturação das gônadas), desencadeando a liberação de Gonadotrofina (hormônio) responsável pela maturação final dos ovócitos para a fecundação. Em segundo lugar, existem estudos que comprovam a influência hormonal deste estímulo. A Hipófise é uma glândula que fica situada na região anterior da cabeça dos peixes. Bem à frente dela, na caixa craniana, existe um pequeno orifício, permitindo que estímulos externos cheguem até a Hipófise. Dentre estes, para fins reprodutivos dos peixes de Piracema, destaca-se a pressão que a água exerce sobre a região cefálica anterior. Da mesma forma, estimulando a região anterior da hipófise, acarretando no mesmo efeito acima descrito para o ácido láctico.” (Costa, 2005).

Em sua trajetória de migração, o peixe enfrenta diferentes regimes de escoamento e velocidades de água. Assim, é necessário ao animal desenvolver diferentes velocidades ao longo de seu trajeto. Essas diferentes velocidades podem ser classificadas em velocidade de explosão, prolongada e de sustentação (Katopodis, 1992).

A velocidade de explosão (do inglês “burst”) corresponde ao início do movimento, quando o peixe necessita de um maior esforço para sair do estado de repouso, para caçar ou fugir de predadores. Essa é a maior velocidade que o animal atinge, e cujo valor é capaz de manter por menos de 15 segundos, devido ao grande gasto de energia envolvido.

A velocidade prolongada corresponde a um valor intermediário e que o animal pode manter por cerca de 200 minutos.

A velocidade de sustentação pode ser mantida pelo animal indefinidamente e é diferenciada para o caso do peixe estar nadando sozinho ou em cardumes, caso em que um animal se utiliza do vórtice gerado por outro. Em canais naturais, o peixe geralmente emprega as velocidades de sustentação e a prolongada, vindo a atingir a velocidade de explosão apenas ocasionalmente, com o intuito de transpor alguma região de velocidades muito altas, como uma corredeira.

As principais forças envolvidas na locomoção do peixe são o arrasto, a impulsão, e as reações à aceleração. O arrasto é função da viscosidade (tensão cisalhante entre a pele do peixe e a água), da forma do animal e dos vórtices causados pela cauda e nadadeiras (Santos, 2004).

O arrasto total pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho S U^2 \quad (3.1)$$

Nessa equação, C_D é o coeficiente de arrasto, S representa a área molhada do peixe, U representa sua velocidade média e ρ é a densidade da água. Para valores de números de Reynolds próximos a 100, o coeficiente de arrasto vale aproximadamente 1, enquanto que, para Reynolds próximos a 10^6 , esse valor pode chegar a 0,001 (Santos, 2004).

A principal característica da água como meio de locomoção é a incompressibilidade (para as velocidades que os peixes atingem) e sua alta densidade. Se o fluido pode ser considerado incompressível, qualquer movimento executado por um animal aquático irá colocá-lo em movimento e vice-versa (Sfakiotakis et al., 1999).

A movimentação do peixe é capaz de anular a esteira de Von Kármán, causada pelo movimento relativo entre seu corpo e a água. Segundo Santos (2004), George e Michael Triantafyllou calcularam o número de Strouhal para o deslocamento do peixe. O número de Strouhal é descrito por:

$$St = \frac{fL}{U}$$

(3.2)

Quando esse parâmetro é calculado em função da movimentação do peixe, f representa a frequência de batimentos da cauda, U a velocidade média de deslocamento do peixe e L a amplitude do rastro formado pelo peixe.

Infelizmente, ainda são raros os estudos realizados sobre a capacidade natatória da ictiofauna encontrada em nosso país. Santos (2004) realizou ensaios com a espécie *Pimelodus maculatus*, conhecida popularmente como mandi amarelo. Em seu estudo o autor pesquisou velocidades médias críticas de 5, 15 e 25 minutos para indivíduos de aproximadamente 25 cm, sendo os menores indivíduos de 20 e os maiores de 27 cm.

Para a velocidade média crítica de 5 minutos valor encontrado foi de aproximadamente 1,33 m/s, para 15 o valor médio foi 1,29 e para 25 minutos o valor médio foi de 1,46 m/s, como mostrado na Figura 3.2.

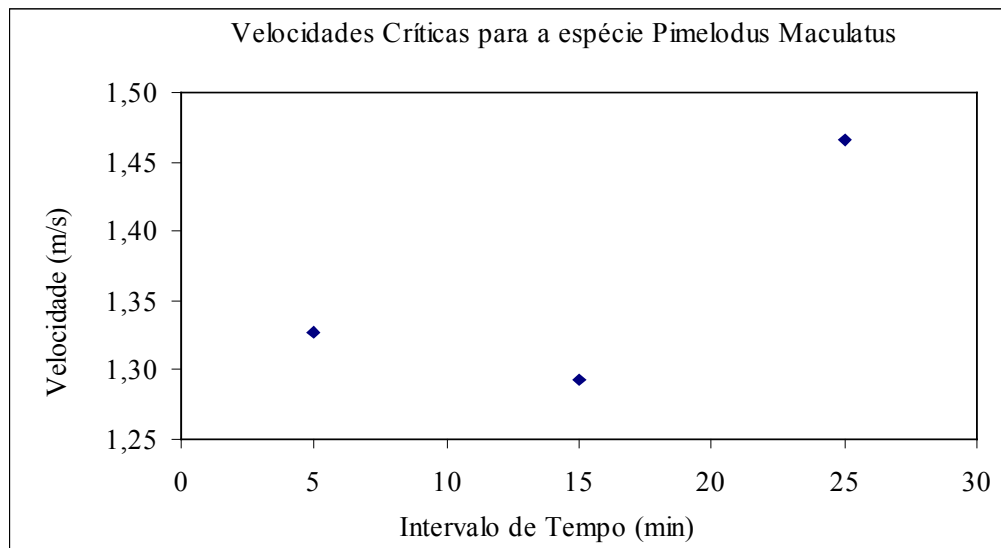


Figura 3.2. Valor médio de Velocidade crítica para a espécie *Pimelodus Maculatus* (Santos, 2004).

Para a espécie *Astyanax spp* (lambari) a velocidade média crítica para indivíduos de aproximadamente 7,5 cm (com valores variando entre 6 e 9 cm) é da ordem de 0,8 m/s, mantida durante 5 minutos (Viana, 2005).

A velocidade média de peixes como o curimatá, a piava e o dourado, contra a correnteza e antes das desovas, pode variar entre 12 a 16 km/dia e, excepcionalmente, o curimatá pode migrar até 43,7 km/dia e o dourado até 30 km/dia (Godoy, 1985). Nesse caso, a velocidade média que um curimatá pode desenvolver ao longo de um dia seria de aproximadamente 0,5 m/s e a de um dourado giraria em torno de 0,35 m/s.

Algumas espécies brasileiras têm a capacidade de vencer grandes obstáculos. Um exemplo é o caso de curimatás que foram marcados a jusante do antigo Salto de Urubupungá (não mais existente) e recapturados a montante do mesmo. Esse salto possuía correntezas de aproximadamente 50 km/h e cerca de 18 m de desnível total (Godoy, 1985). Provavelmente o animal procurava as zonas de menores velocidades da seção transversal do rio, conseguindo assim, transpor a correnteza.

A Figura 3.3 apresenta algumas espécies migratórias de peixes comuns nas águas doces brasileiras.

Cursos d'água bloqueados por barramentos e outras estruturas hidráulicas apresentam prejuízos diretos e indiretos a ictiofauna. Não há dúvidas de que muitas são as alterações geradas em um curso d'água quando da construção de uma estrutura de bloqueio. Um dos principais prejuízos que esse tipo de estrutura causa à ictiofauna é impedir que peixes com características migratórias possam completar seu ciclo de vida. Para os peixes que migram, o barramento representa um obstáculo que impede o livre deslocamento entre as áreas de alimentação e de desova. Em primeiro plano, os habitats a montante ficam inacessíveis aos cardumes em migração, mas, indiretamente, também os peixes que não migram são prejudicados. Um dos exemplos de prejuízo indireto é a falta de nutrientes causada pelo bloqueio da vinda de peixes de jusante para montante e a mudança na distribuição de sedimentos em habitats de jusante (Chiu et al., 2002).

A construção de bloqueios em cursos d'água pode impedir ou atrasar a migração de peixes, contribuindo para o declínio e até mesmo para a extinção de espécies migratórias, que dependem de movimentações ao longo de cursos d'água, em determinadas épocas de seu ciclo de vida (Katopodis, 1992).

Com o objetivo de atenuar esses efeitos negativos, são construídos Mecanismos de Transposição para Peixes (MTP). Estas obras hidráulicas têm o intuito de promover a passagem segura de cardumes através de obstáculos.

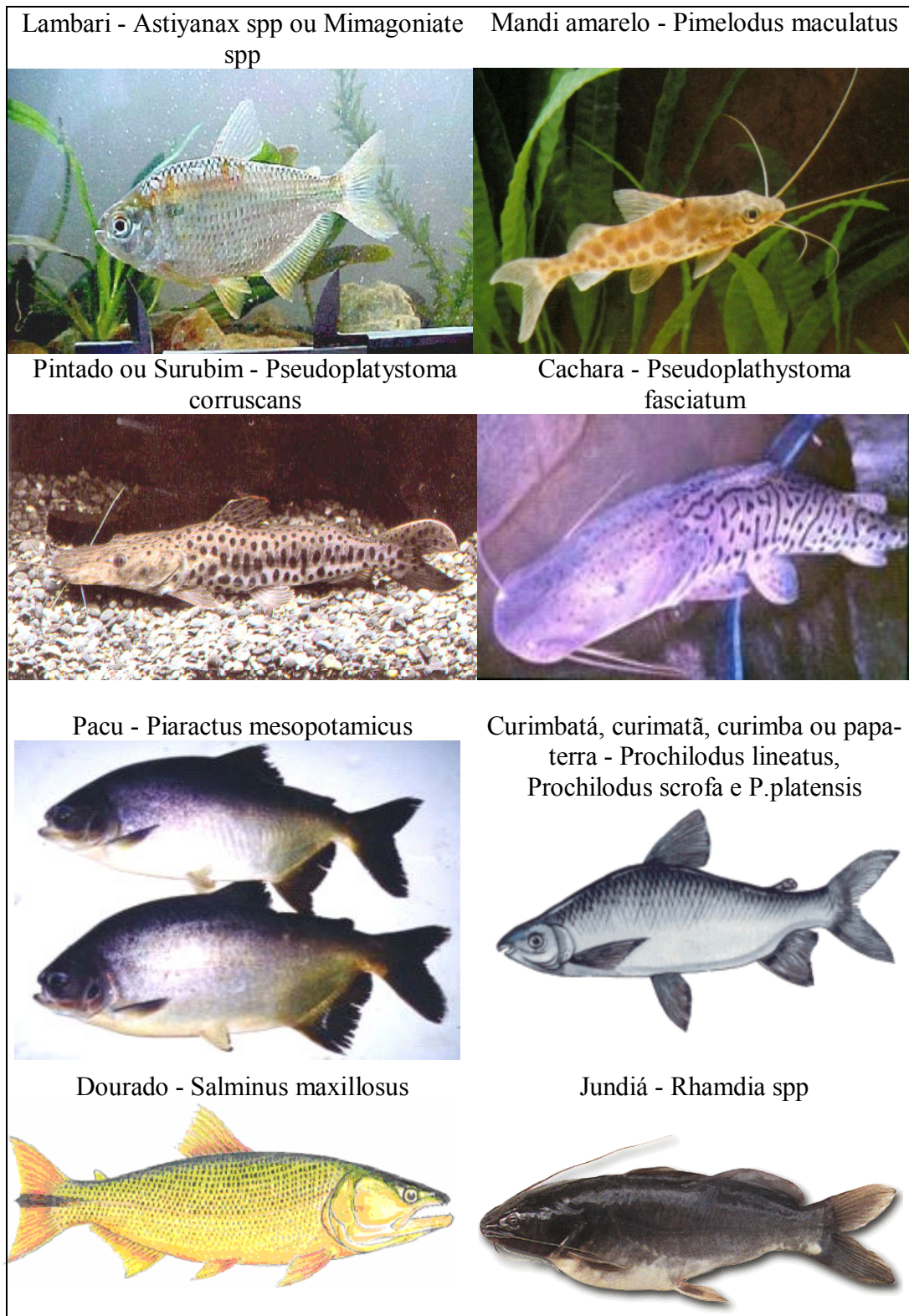


Figura 3.3. Algumas espécies com características migratórias encontradas no Brasil.
Fonte: Guia Ilustrado de peixes da bacia do Rio Grande.

4.4 Mecanismos de Transposição para Peixes

Desde o princípio de sua adoção, estruturas de passagem para peixes têm gerado muitos resultados positivos (Clay 1995). No entanto, a simples construção, por si só, de um MTP, não garante a migração de uma espécie. A passagem deve ser mantida em condições satisfatórias permanentemente, e sua eficiência constantemente verificada. Um projeto bem sucedido de um MTP requer conhecimentos no campo da hidráulica e da biologia (Porcher et al., 2002). Características biológicas como o comportamento das espécies alvo, suas prioridades, seus ritmos de migração e suas habilidades natatórias devem ser a base dos critérios de projetos de MTP, caso contrário, os mecanismos tornam-se ineficientes, como nas escadas construídas na bacia do rio Zwalm (Bélgica), cujos tipos e operações eram inapropriados para as comunidades de peixes lá existentes (D'heygere et al., 1998).

Também no Brasil deve-se prevenir a adoção indiscriminada de estudos e projetos realizados em outros países, com espécies diferentes das aqui encontradas, prática bastante comum nos projetos de MTP implantados em nosso país.

Sendo a migração um fenômeno de duração limitada, o tempo de transposição também é um dos fatores importantes no projeto deste tipo de estrutura. Dependendo do tipo de migração, a demora ao transpor o mecanismo pode ser mais ou menos prejudicial. Para migrações de reprodução, um eventual atraso é mais crítico para seu sucesso do que no caso de migrações tróficas (Katopodis, 1992).

Infelizmente, o entendimento de que um mecanismo de transposição deve ser um projeto complexo, envolvendo questões de hidráulica e de biologia, é recente. A história das estruturas de passagem para peixes foi marcada por concepções errôneas e falta de conhecimento, incluindo informações de bioengenharia inadequadas, carência de informações sobre a capacidade de locomoção dos peixes e critérios de projeto não testados (Chiu et al., 2002).

Os primeiros dispositivos para passagem de peixes foram construídos na Europa ainda no século XVII. No início, os projetos eram concebidos de uma forma totalmente empírica para então, no século XX, passarem a ter um embasamento científico.

Em países como o Brasil, o conhecimento relativo a estruturas de transposição é ainda mais precário. “No Brasil, como na maioria dos países subdesenvolvidos, devido a fatores históricos, financeiros, políticos, institucionais e culturais desfavoráveis, há uma defasagem tecnológica quanto aos Sistemas de Transposição de Peixes, pelo menos secular, com conseqüências imensuráveis ao ambiente e ao universo dos peixes.” (Martins, 2000).

O fato de, em países como o nosso, imperar a diversidade ictiológica e o escasso conhecimento correlacionado, faz com que a etapa investigativa experimental seja árdua e de fundamental importância (Martins, 2000).

Na Europa e na América do Norte, no entanto, os conhecimentos tanto das espécies quanto de passagens adequadas a elas vêm sendo bem explorados. “O renascimento na pesquisa de passagem de peixes e desenvolvimento tem ocorrido nas últimas duas décadas, particularmente na América do Norte e na Europa. Isto culminou no primeiro Simpósio de Passagem de Peixes em Gifu, Japão, em outubro de 1990.” (Katopodis, 1992).

Um grande passo para os projetos de MTP foi dado por Denil em 1909. Ele descreveu o projeto de um canal dotado de ranhuras capazes de dissipar a energia da água. Este canal é um tipo de escada de peixes que recebeu o seu nome e ainda hoje é usada. O trabalho de Denil serviu de impulso para futuros estudos sobre o comportamento da ictiofauna e da aplicação da engenharia hidráulica para resolver problemas ligados a ela. A partir daí muitas foram as barragens que passaram a ser construídas com estes dispositivos, principalmente na Europa e nos Estados Unidos (Chiu, et al., 2002).

Baseado em princípios similares aos de Denil, Milo C. Bell projetou uma escada dotada de uma série de defletores (ou septos), igualmente espaçados, para dissipar a energia da água. Este tipo de escada é chamado de slot vertical, ou ranhura vertical (Chiu, et al., 2002).

Em 1937 os conhecimentos sobre o comportamento da ictiofauna e da engenharia hidráulica foram realmente combinados, o que resultou na construção da maior e mais eficiente estrutura de passagem de peixes que já havia sido construída (Clay, 1995). Esta estrutura faz parte da Barragem Bonneville, no rio Columbia (Washington) e foi projetada por hidráulicos e biólogos do U.S. Fish and Wildlife Service. Porém, no ano de 1948, um estudo realizado nessa barragem pelo mesmo órgão que a construiu mostrou que havia uma mortalidade de

15% na passagem dos peixes para jusante. A partir daí, biólogos procuraram aumentar o conhecimento sobre as necessidades dos animais na tentativa de diminuir as perdas.

Infelizmente, ainda hoje, nem todos os MTP consideram a migração como um fenômeno de ida e volta. Neste caso, em UHE, as turbinas e os vertedouros acabam sendo os caminhos encontrados pelos peixes na transposição para jusante. Cada uma dessas rotas de passagem tem um risco distinto de morte para o animal. O risco de morte para peixes que atravessam uma barragem pelas turbinas é de 1 a 17% (U. S. Corps of Engineering, 2005).

Na hidrelétrica de Itaipu existe um programa de retirada de indivíduos de dentro dos condutos que levam água para as turbinas, quando as máquinas param para manutenção. Em 350 operações de retirada de peixes, realizadas entre os anos de 1987 e 2000, cerca de 50 mil peixes foram resgatados para posterior retorno do animal no reservatório ou no rio, a jusante. O maior exemplar salvo foi um jaú de 50 quilos (Itaipu, 2005)

Outro caminho freqüente para os peixes que migram para jusante é a passagem pelo próprio vertedouro da barragem. O principal risco associado à passagem pelo vertedouro está ligado à inserção de ar no escoamento, na queda da água na bacia de dissipação, causando supersaturação de ar, que, se suficientemente alto, pode ser extremamente prejudicial ao animal. Como obras de mitigação desse impacto estão sendo usados defletores (“Flip Lips”) que provocam um escoamento mais horizontal em vertedouros e limitam a queda profunda do escoamento do vertedouro sobre a bacia de dissipação, diminuindo a entrada de nitrogênio (Figura 3.4). Também estão sendo avaliados diferentes tipos de vertedouros e de bacias de dissipação para diminuição de entrada de ar (U. S. Corps of Engineering, 2005).

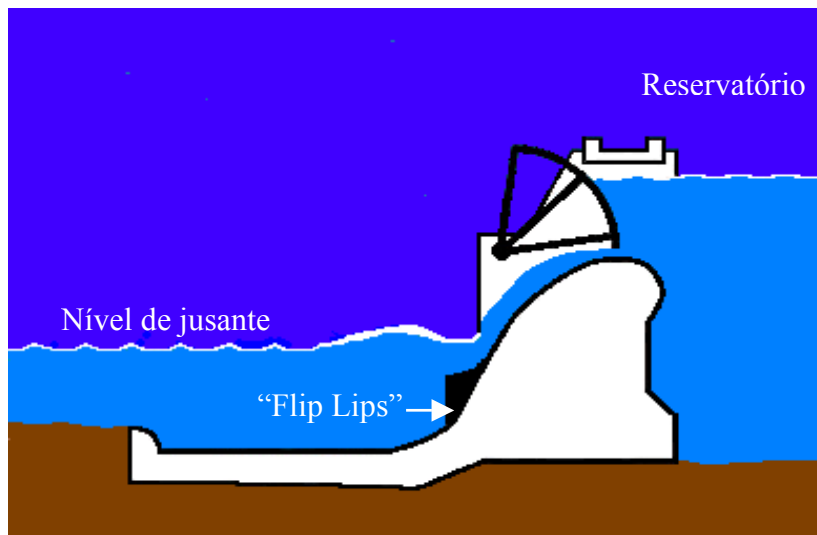


Figura 3.4. Defletores ("Flip Lips") para diminuir a entrada de ar no escoamento sobre vertedouros.

Fonte: U. S. Corps for Engineering.

Como forma de diminuir a mortalidade de animais que usam as turbinas como rota, o U. S. Corps of Engineering projetou um sistema de tela de proteção nas tomadas d'água das barragens dos rios Columbia e Snake. Os animais ficam presos pela tela, sendo então direcionados a um canal que os leva para jusante de forma segura, como é mostrado na Figura 3.5.

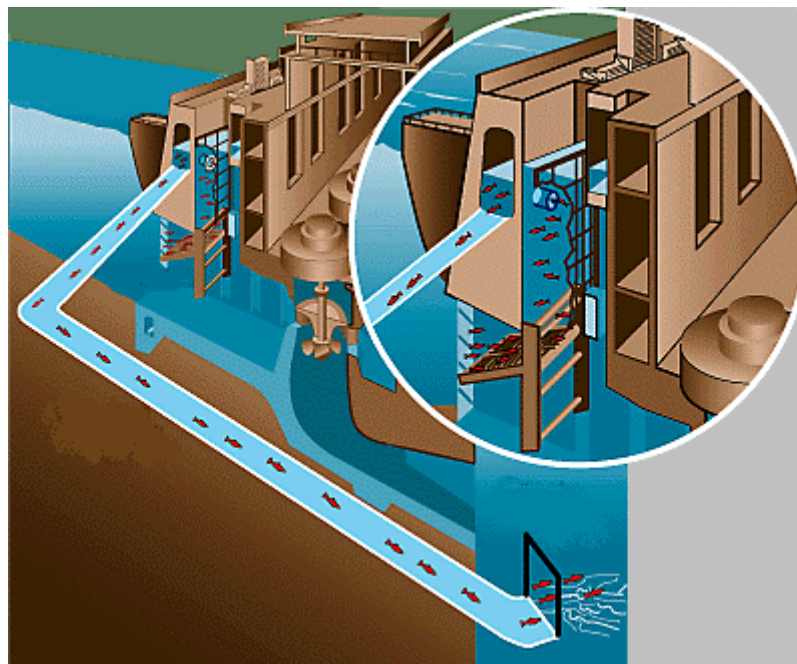


Figura 3.5. Tela de proteção na tomada d'água e canal para passagem segura.

Fonte: U. S. Corps for Engineering.

No Brasil, apesar da incipiência relativa ao assunto, existem casos bem sucedidos de mecanismos de transposição, como é o caso da barragem de Cachoeira das Emas, em Pirassununga, no estado de São Paulo. Nessa barragem do Rio Mogi-Guaçu, por meio de uma escada de peixes apropriada, os cardumes conseguem vencer o obstáculo e ganham o rio a montante da mesma, continuando a migrar até a barragem de Cachoeira de Cima (na cidade de Mogi-Guaçu). Também nessa barragem existe uma escada adequada, e os peixes continuam a migração por mais 32 km até o Salto do Pinhal, limite migratório de montante. Subindo e descendo esses locais mencionados, os peixes chegam a completar 1200 km por ano (Godoy, 1985).

Na barragem de Cachoeira das Emas, em dia de grande subida, entre os anos de 1954 e 1963 podiam ser contados até 3.000 peixes transpondo a escada por hora. Assim, em dias favoráveis, cardumes de 100.000 peixes, em média, podiam vencer a escada em cerca de 2 a 4 dias (Godoy, 1985).

A instalação de mecanismos de transposição para peixes no Brasil vem sendo impulsionada a partir da edição de leis estaduais que visam atenuar os impactos dos barramentos sobre os peixes de piracema. Em alguns estados existem leis que tornam obrigatória a construção de Mecanismos de Transposição. Este é o caso de São Paulo, Pará e Minas Gerais (Magalhães, 2004), que, com o intuito de diminuir o impacto negativo que os barramentos causam nos cursos d'água, tornaram, desde 1997, obrigatória a construção de sistema de transposição em certas barragens localizadas em seus territórios, exceto quando, em virtude das características do projeto, a medida for considerada ineficaz.

O artigo primeiro da Lei nº 12.488, de 9 de abril de 1997, do Estado de Minas Gerais, decreta: “É obrigatória a construção de escadas para peixes de piracema em barragens a ser edificada em curso de água de domínio do Estado.”

Modernos projetos de mecanismos de transposição para peixes devem incluir aspectos como (Viana, 2005): otimização das velocidades de forma a minimizar o tempo de transposição, vazão adequada às necessidades das espécies alvo e negociada de acordo com o potencial da obra de represamento, possibilidade de funcionamento na maior amplitude possível de escoamentos e possibilidade de migração de montante para jusante.

Com a construção de barragens cada vez mais altas a partir dos anos 20, as escadas passaram a ser uma opção economicamente pouco viável de dispositivo para transposição. Foi então que começaram a surgir outros tipos de dispositivos, como elevadores e eclusas. A utilização de escadas pode ser considerada prática usual em desníveis inferiores a 10 m. Na faixa entre 10 e 20 m, escadas, eclusas e elevadores podem ser utilizados. As eclusas são utilizadas geralmente para a transposição de desníveis não superiores a 40 m. Os elevadores possibilitam a transposição em qualquer faixa de desnível.

Assim, os mecanismos de transposição para peixes podem ser agrupados em três categorias gerais: elevadores, eclusas e escadas (Clay, 1995).

4.3.1. Mecanismos de Transposição para Peixes do tipo Elevadores

Elevadores são definidos como quaisquer dispositivos, tais como tanques movimentados por cabos, caminhões-tanque, tanques em planos inclinados e outros, que transportem, por meio de equipamentos mecânicos, os peixes de jusante para montante de uma barragem. A Figura 3.6 representa esse tipo de estrutura.

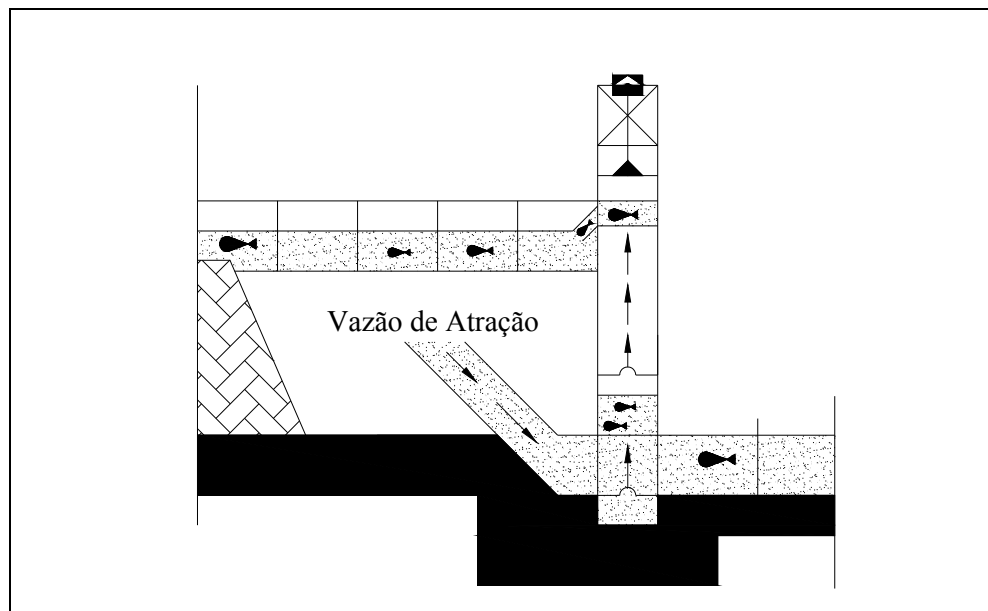


Figura 3.6. Representação de um elevador para peixes.

Na América do Sul, os elevadores vêm sendo uma opção muito usada nos últimos tempos, baseada na premissa de que esse tipo de estrutura permite a transposição de um grande

número de indivíduos e todas as espécies locais (Clay, 1995). Sendo a América do sul dotada de uma grande amplitude de espécies, uma das soluções é a adoção desse tipo de estrutura abrangente em demanda. Essa escolha também é influenciada pela falta de conhecimento das espécies migratórias de cada região e de suas características. No entanto, conhecendo-se as espécies alvo e suas características, não necessariamente o mecanismo precise ser tão generalista como um elevador.

4.3.2. Mecanismos de Transposição para Peixes do tipo Eclusas

Eclusas são dispositivos que consistem em câmaras ou tanques, nos quais o peixe entra ao nível de água de jusante. Após a entrada do cardume, a câmara é fechada por uma comporta e seu nível d'água se eleva até o nível da câmara de montante (Figura 3.7). O animal segue sucessivamente de uma câmara à outra até atingir o reservatório.

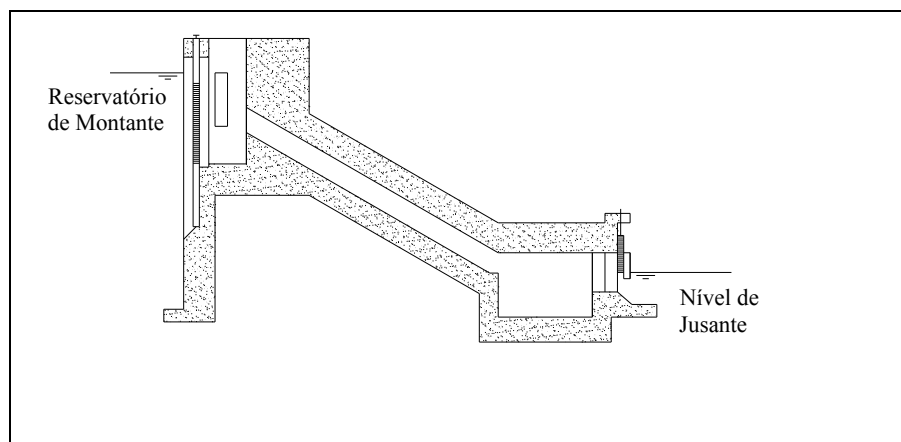


Figura 3.7. Representação de uma eclusa para peixes.

4.3.3. Mecanismos de Transposição para Peixes do tipo Escadas

De uma maneira geral, escadas são canais constituídos de uma série de tanques em desníveis, que conduzem água do reservatório gerado pelo barramento para o trecho de rio à jusante. Os tanques são separados por defletores, que têm como objetivo dissipar a energia do escoamento, de modo a permitir o deslocamento dos peixes, nadando ou saltando de um tanque para outro. Os defletores formam jatos de alta velocidade, que, ao entrarem no volume de água da piscina seguinte têm parte de sua turbulência absorvida e parte de sua energia dissipada (Clay, 1995).

Assim, hidraulicamente falando, escadas são estruturas dissipadoras de energia e biologicamente falando, escadas de peixes são estruturas especialmente construídas para auxiliar a migração de cardumes através de obstruções que bloqueiam seu caminho para regiões de desova ou outro tipo de migração (Kamula, 2001).

Possivelmente, a escada mais usada no mundo tenha sido a do tipo piscina vertedouro, que se originou a partir de uma série de tanques ou piscinas escavadas em degraus em torno de barramentos (Clay, 1995).

Como sinônimo de Escada para Peixes também são usados os termos Canal de Piracema e Canal de Ictiofauna. Aqui serão usados os três termos para designar o mecanismo de transposição de que estamos tratando. Os termos “fishway” e “fish ladder” são comumente usados na América do Norte, ao passo que o termo “fish pass” é mais usado na Europa. Na Figura 3.8 está representado um tipo de escada de peixes, conhecido como piscina vertedouro.



Figura 3.8. Escada do tipo piscina vertedouro da Barragem de John Day, no rio Columbia.

Como cada bloqueio em um rio representa uma situação única, muitos são os fatores que devem ser observados no projeto e alocação de uma escada para peixes, de forma a estar a escada devidamente adequada à situação. Dificilmente um só projeto irá atender a todas essas

situações diversas, isso porque cada uma delas possui características que precisam ser levadas em conta.

Quanto à escada em si, variáveis como a vazão, a dissipação de energia, a áreas de descanso (de baixa velocidade dentro dos tanques), o jato nos tanques, a velocidade de atração, a turbulência na entrada e o tamanho dos tanques são apenas alguns dos fatores que devem ser considerados quando do seu projeto.

Uma escada bem projetada possui velocidades máximas próximas as máximas velocidades cujas espécies alvo sejam capazes de nadar e velocidades de descanso de acordo com as velocidades de sustentação dessas espécies, sem, no entanto, atingir um valor muito grande de dissipação de energia.

A dissipação de energia dentro das piscinas não deve ser superior a $0,191 \text{ W/m}^3$ se for dada por (Rajaratnam et al., 1986):

$$k = \frac{Q\gamma\Delta h}{BLy_0} \quad (3.3)$$

em que:

B é a largura da piscina (m);

L é o comprimento da piscina (m);

y_0 é a altura média da lâmina d'água em um tanque(m);

k é a dissipação de energia (W/m^3);

γ é o peso específico da água (N/ m^3).

As principais partes que compõem uma escada de peixes são a entrada, o centro e a saída. A entrada, provavelmente, seja a mais importante delas, no que diz respeito ao desempenho dessas estruturas (Clay, 1995). A entrada corresponde ao local de entrada dos peixes e saída da água e sua importância está ligada ao fato de ser ela a responsável pela atratividade das espécies alvo.

Em barragens de usinas hidrelétricas, onde a água que sai das turbinas ou mesmo dos vertedouros causa uma grande atratividade para os peixes, a entrada assume uma importância ainda maior (Clay, 1995).

A atratividade é garantida por fluxos de altas velocidades, geradas pela declividade do canal e a largura da entrada da escada (Chiu, et al., 2002). No entanto, o valor da velocidade deve ser compatível com a capacidade do animal, evitando o desgaste desnecessário de energia. Além disso, velocidades muito altas podem tornar o escoamento muito turbulento, o que pode provocar a entrada excessiva de ar e originar vórtices de grande escala, capazes de confundir o animal. É importante também que a velocidade da água seja constante, tanto para atrair o animal quanto para evitar a supersaturação por nitrogênio. Em escadas sem manutenção essa velocidade constante pode deixar de existir (Chiu, et al., 2002). Mudanças nos níveis de montante e de jusante da escada, por meio da operação da barragem ou por meios naturais também podem tornar o funcionamento da estrutura inadequado.

No ano de 2003, o Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, apresentou um relatório sobre o estudo “Avaliação da Eficácia das Passagens para Peixes de Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos”, realizado em Portugal. Os autores investigaram diversas passagens para peixes, em particular os aspectos ligados à relação do comportamento e da biomecânica das espécies de peixes com as condições hidráulicas dos dispositivos. Entre os aspectos analisados estavam: a atratividade da entrada, a possível obstrução a jusante, possível assoreamento nas escadas, entre outros. Cada um desses itens era avaliado como tendo: boas condições, condições aceitáveis, condições inaceitáveis, ou inoperante. O resultado obtido é mostrado na Figura 3.9 (Pinheiro, 2003).

Uma avaliação criteriosa sobre as condições de manutenção e funcionamento de mecanismos de transposição instalados em nosso país seria de extrema importância, uma vez que não se tem conhecimento sobre nenhuma publicação a esse respeito.

Os principais problemas encontrados pelo autor nas escadas avaliadas eram devido às más condições de operação e manutenção. Os problemas mais comuns relatados foram os de deposição de sedimentos e nível de jusante muito abaixo da entrada da escada. A Figura 3.10 apresenta os principais problemas encontrados no estudo.

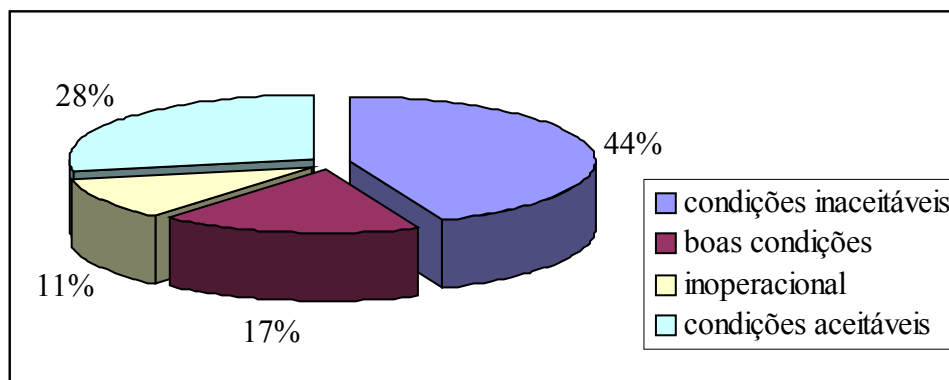


Figura 3.9. Resultado da avaliação da qualidade das passagens para peixes em Portugal.
Fonte: Pinheiro, 2003.



Figura 3.10. Principais problemas relativos ao funcionamento de escadas para peixes em Portugal.
Fonte: Pinheiro, 2003.

A saída da escada (entrada d'água) também pode apresentar problemas de manutenção. Muitas vezes é necessária a remoção, manual ou por meio de limpadores mecânicos, de corpos flutuantes que são carregados pelos rios e que se prendem geralmente nas grades das tomadas d'água das escadas (Magalhães, 2004).

Quando a velocidade na entrada da escada não atinge a velocidade de interesse, um fluxo de atração pode ser utilizado nessa região, de maneira evitar que o cardume nade em direção às turbinas, por exemplo, como é usual acontecer. O fluxo para atração é desviado diretamente do reservatório e permite o direcionamento dos cardumes para dentro do mecanismo. Cada espécie de peixe é atraída por uma diferente velocidade de fluxo, o que pode tornar o projeto complexo no caso de muitas espécies necessitarem transpor um determinado canal (Chiu, et al., 2002).

A importância da entrada neste tipo de estrutura pode ser verificada em um estudo realizado no Grand River (Ontário). Desde 1994 havia um monitoramento no local (temperatura,

velocidade d'água, etc.) em duas escadas do tipo Denil. Pequenas alterações nas condições da entrada resultaram no aumento da atração da espécie *Lepomis gibbosus*. A entrada foi alargada e reposicionada a aproximadamente 2m mais próximo da represa. Depois das modificações houve um aumento entre 2,6 e 3 vezes no uso da escada (Bunt, 1999). O autor concluiu que, de uma forma geral, a entrada da escada deve estar locada tão próximo quanto seja possível da barragem, mas a velocidade da água do vertedouro e da descarga de fundo não pode comprometer o acesso do animal. Um exemplo de posicionamento correto da entrada da escada em relação o vertedouro está representado, em planta, na Figura 3.11 (Larinier, 2002).

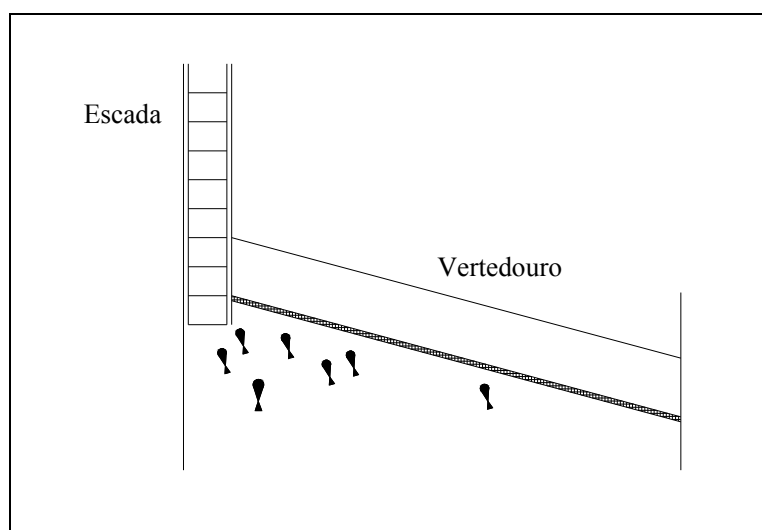


Figura 3.11. Posicionamento adequado da entrada da escada em relação ao vertedouro.

Fonte: Larinier, 2002, adaptado.

Os principais parâmetros de dimensionamento de escadas para peixes são as dimensões dos tanques e a geometria dos septos ou paredes que os formam (Larinier, 2002). Os septos podem estar a plena seção do canal, formando um vertedouro ou a meia seção, formando uma ranhura. Caso estejam a plena seção do canal, os fatores relevantes serão as formas dos vertedouros, suas alturas e a presença ou não de orifício. Já para septos com ranhuras, os fatores de importância no dimensionamento serão a abertura dos septos (tamanho da ranhura) e a quantidade delas (uma ou duas ranhuras por tanque).

De uma forma geral, as escadas para transposição de peixes são divididas em três tipos: as do tipo piscina vertedouro (do inglês *pool and weir*), as do tipo Denil e as do tipo ranhura vertical (ou *slot vertical*) (Clay, 1995). Um outro tipo de escada é chamado de canal natural (Larinier, 2002).

3.2.3.1. Escadas tipo Denil

O canal de ictiofauna do tipo Denil é essencialmente um canal reto e retangular dotado de septos ou anteparos rentes ao fundo e às paredes (Katopodis, 1992). Os septos são providos de aberturas, como mostrado na Figura 3.12.

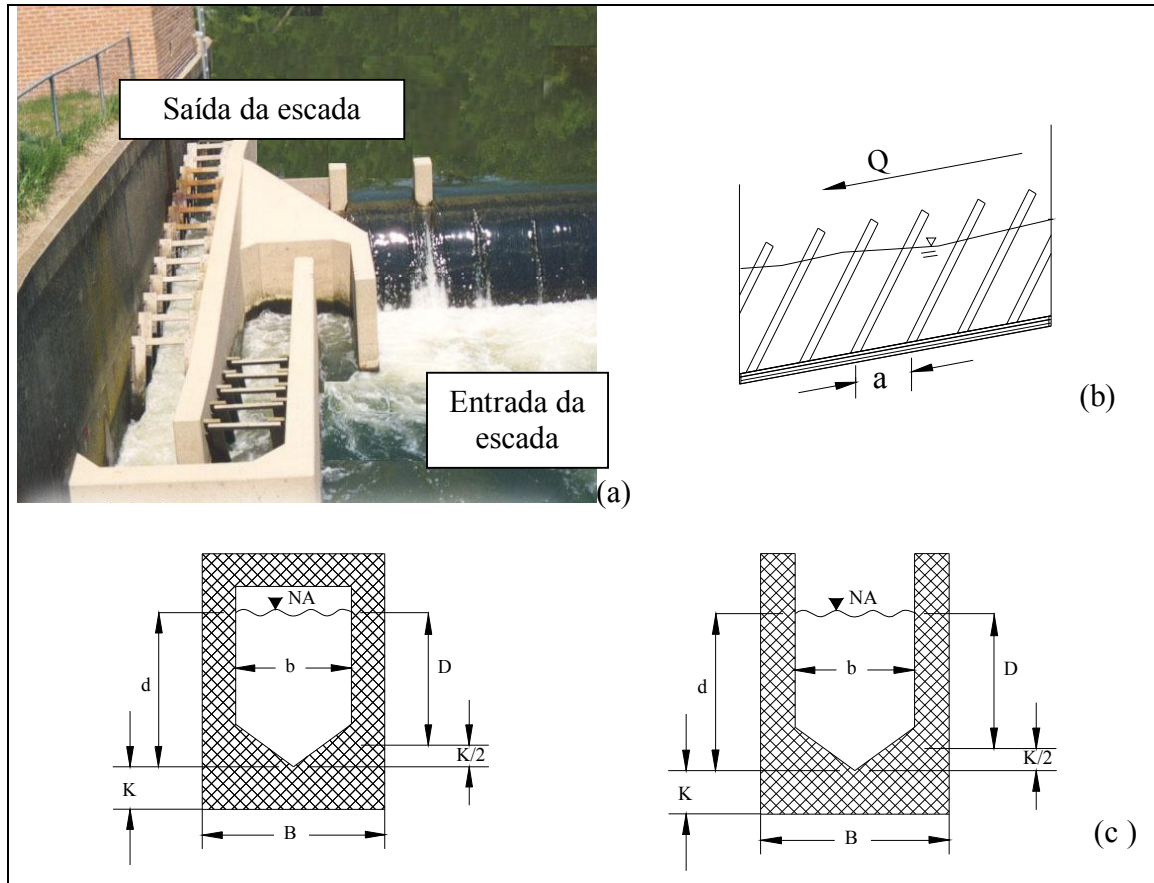


Figura 3.12.(a) Foto de um canal de ictiofauna do tipo Denil, (b) vista lateral e (c) vista frontal de dois tipos de septo.

Os anteparos ou septos podem ser fechados ou abertos na parte superior. Os espaços entre os septos são projetados de forma a criar turbulência e assim dissipar energia, gerando velocidades possíveis para a transposição. O padrão de circulação da água para esse tipo de escada está representado na Figura 3.13 (Katopodis, 1992).

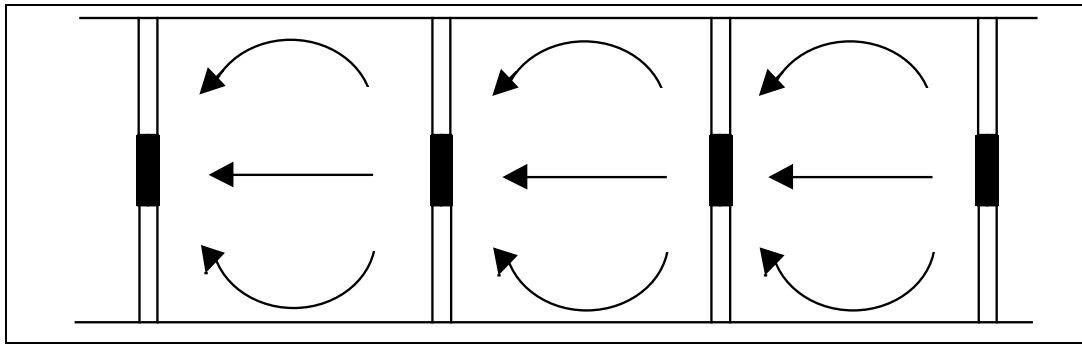


Figura 3.13. Padrão de circulação da água para escada tipo Denil.

O projeto do septo recomendado pelo Comitê de Passagem de Peixes do Canadá (1942) para uma escada deste tipo é de 0,92 m de largura, com septos espaçados de 0,61 m (2/3 da largura do canal) e inclinação de 45°. A declividade máxima permitida é de 1:6. O vão central é de 0,54m e a profundidade operacional variando de 0,61 a 0,92 m. A vazão nominal varia de 0,28 a 0,34 m³/s. As equações referentes a este tipo de escada, neste trabalho, consideram o ângulo de inclinação igual a 45°.

A vazão que passa por este tipo de escada pode ser determinada pela Equação 3.4 (Rajaratnam e Katopodis, 1984).

$$Q = bD \left[\frac{2gS_0 bD}{b + 2D} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{C_f}} \quad (3.4)$$

Nessa equação, b é a abertura do septo (tamanho da ranhura) (m) e $D = d - K/2$ (m) (Figura 3.12); C_f é o coeficiente de cisalhamento; g é a aceleração da gravidade (m/s²) e S_0 é a declividade do canal (m/m).

Ao tornar adimensional a vazão, em função da profundidade relativa Y/b (profundidade da linha d'água e abertura do septo, respectivamente), Rajaratnam e Katopodis (1984) propuseram a relação representada pela Equação 3.5.

$$Q_* = \frac{Q}{\sqrt{gS_0 b^{\frac{5}{2}}}} \quad (3.5)$$

Em que:

Q_* é a vazão adimensional;

Q é a vazão (m^3/s);

b é a abertura do septo (m);

S_0 é a inclinação (m/m);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Rajaratnam e Katopodis (1984) verificaram que, para valores de $Y/b < 1$, o perfil de velocidades apresenta regiões de baixas velocidades em pequena parte do escoamento e velocidade elevada na superfície. Para valores de $Y/b > 3$ a região de velocidades baixas constantes desaparece e a velocidade aumenta continuamente do fundo para a superfície. O experimento foi realizado em um modelo de escala 1:1 e 1:3 (respeitando o Critério de Semelhança de Froude) e com o ângulo de inclinação dos septos igual a 45° .

Na tentativa de generalizar uma equação de descarga adimensional para diferentes geometrias, Katopodis et al. (1997), relacionaram a distância entre ranhuras, “a”, e a sua abertura, “b”, da seguinte forma:

$$r_a = \frac{\left(\frac{a}{b}\right)}{\left(\frac{a}{b}\right)_s}, \quad (3.6)$$

sendo a_s o espaço entre as ranhuras para o projeto padrão (0,25m) e b_s a abertura do septo para o projeto padrão (0,36m).

Desta forma, para valores de r_a entre 0,78 e 1,27, a vazão adimensional é descrita pela Equação 3.7.

$$Q_* = 2,43 \left(\frac{Y}{b}\right)^{1,43} \quad (3.7)$$

Para valores de r_a entre 1,5 e 2,40 a vazão adimensional é descrita pela Equação 3.8.

$$Q_* = 1,22 \left(\frac{Y}{b}\right)^{1,6} \quad (3.8)$$

E, finalmente, para r_a entre 3,12 e 9,36, a vazão adimensional pôde ser descrita pela Equação 3.9.

$$Q_* = 0,827 \left(\frac{Y}{b} \right)^{1,43} S_0^{-0,2} r_a^{0,15} \quad (3.9)$$

Nessas equações, Y é a profundidade da lâmina d'água (m); b é a abertura do septo (m); S_0 é a declividade do canal (m/m) e r_a é a razão entre a distância das ranhuras e a abertura que há nelas.

As altas velocidades que essa estrutura apresenta podem torná-la intransponível para peixes pequenos (menores que 20 ou 30 cm). No entanto, peixes pequenos têm sido observados transpondo este tipo de canal quando estes possuem níveis d'água insuficientes para causar correntes helicoidais (Larinier, 2002).

3.1.1.2 Escadas tipo Piscina Vertedouro

Este é o tipo de escada mais amplamente usada (Larinier, 2002). É adequada para peixes com alta capacidade natatória e peixes capazes de saltar, como o salmão, por exemplo (Nakamura, 1995).

Neste tipo de estrutura, vertedouros submersos formam piscinas a distâncias padronizadas (Figura 3.14).

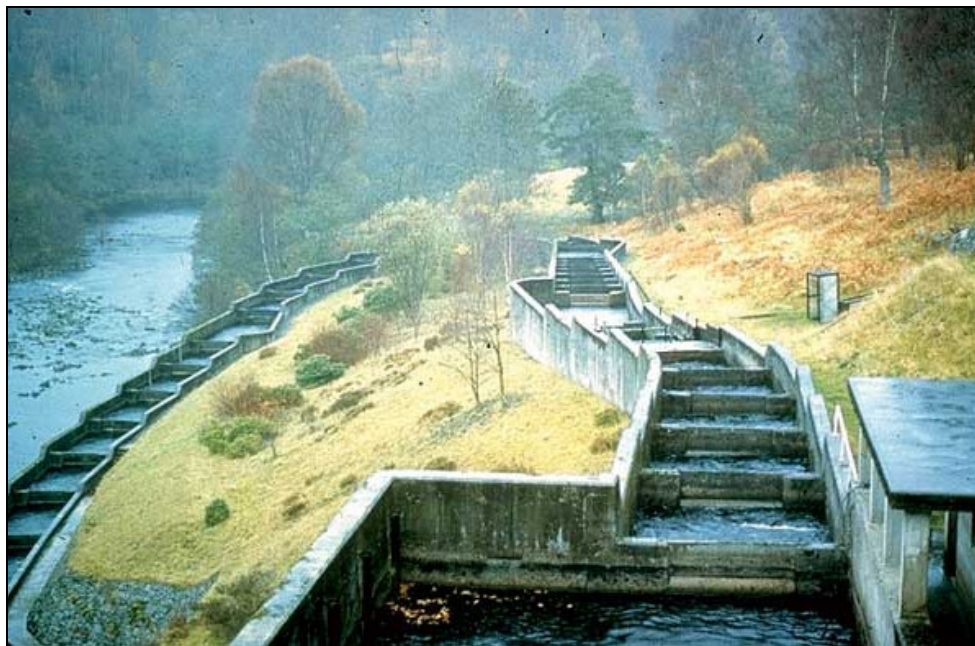


Figura 3.14. Escada de Peixes do tipo Piscina Vertedouro com orifício. Barragem Clunie, Escócia.

Os vertedouros podem assumir diversas formas, como retangulares, em V ou semicirculares (Larinier, 2002). As paredes que formam os vertedouros podem possuir ou não orifício. Os orifícios também podem ter vários formatos e posições, podem ainda estar em apenas em um dos lados ou alternarem lado direito e lado esquerdo simultaneamente.

Em uma escada do tipo Piscina Vertedouro o escoamento pode se dar de duas formas: sobre vertedouros livres ("plunging flow") ou sobre vertedouros submersos ("streaming flow"), dependendo da altura da lâmina d'água, para uma dada declividade S_0 e um comprimento de tanque L (Katopodis, 1992). Esses dois tipos de escoamento estão representados na Figura 3.15 e 3.16. Nessas figuras, "p" representa a altura do vertedouro e "L" o comprimento da piscina ou tanque, "h" representa a carga hidráulica sobre o vertedouro livre e "d" a altura d'água sobre o vertedouro submerso.

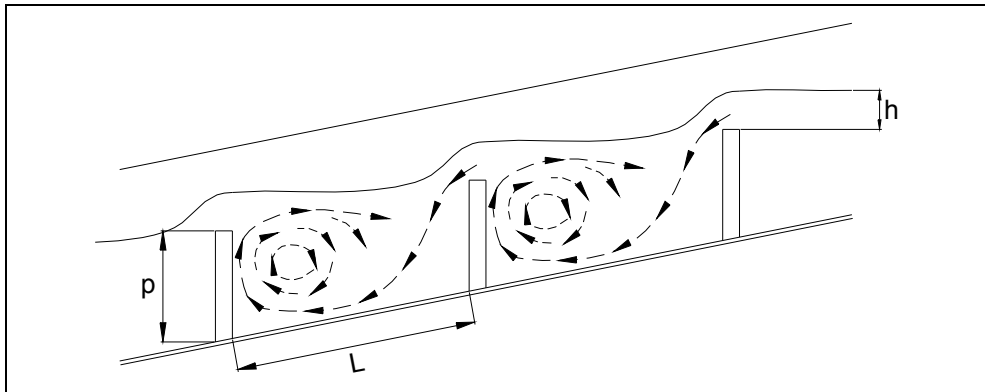


Figura 3.15. Perfil da linha d'água e padrão de circulação para escoamento sobre vertedouros livres ("plunging flow") (Katopodis, 1992 e Larinier, 2002).

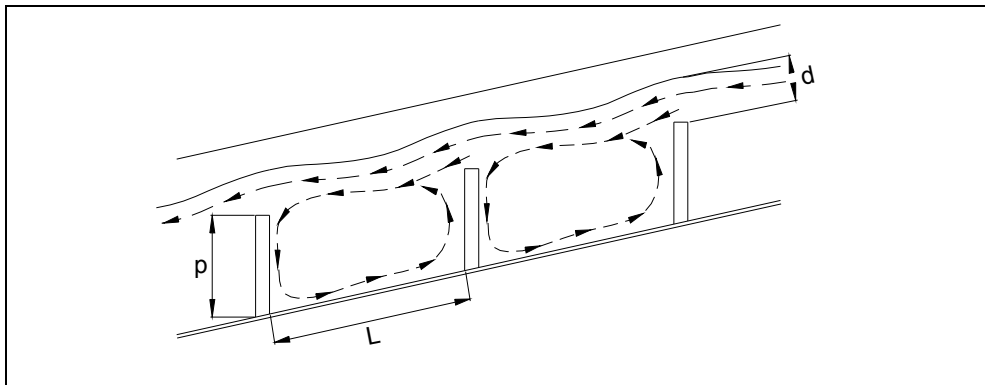


Figura 3.16. Perfil da linha d'água e padrão de circulação para escoamento sobre vertedouros submersos ("streaming flow") (Katopodis, 1992 e Larinier, 2002).

No escoamento sobre vertedouros livres, a dissipação de energia se dá principalmente pela turbulência causada pelo impacto da água no fundo da piscina (Larinier, 2002). Esse tipo de escoamento se dá quando o nível de jusante está abaixo da altura do obstáculo.

Em escadas com escoamento sobre vertedouros livres cujo nível de jusante está significativamente abaixo da altura do obstáculo, o peixe necessita saltar através desse para atingir o tanque seguinte. Essa característica torna esse tipo de escada muito seletiva, uma vez que nem todos os peixes possuem essa capacidade.

No escoamento sobre vertedouros submersos a dissipação de energia se dá pela tensão cisalhante entre o jato, de altura praticamente constante " d ", e a massa d'água que recircula dentro da piscina. Esse tipo de escoamento se dá quando o nível de jusante do vertedouro é aproximadamente a metade do nível de montante do obstáculo (Larinier, 2002). As equações de descarga adimensional para os dois tipos de escoamento estão mostradas na Tabela 3.1 (Katopodis, 1992).

Tabela 3.1. Equações de descarga adimensional para os dois tipos de escoamento em escadas do tipo piscina vertedouro.

Vazão para escoamento sobre vertedouros	
livres ("plunging flow")	submersos ("streaming flow")
$Q_p = \frac{Q_w}{Bh^{1,5}\sqrt{g}} = 0,61 \quad (3.10)$	$Q_s = \frac{Q_w}{Bd^{1,5}\sqrt{gS_0}} = 1,5\sqrt{\frac{L}{d}} \quad (3.11)$
	$V = \frac{Q_w}{Bd} \quad (3.12)$

sendo:

Q_p : vazão adimensional para escoamento sobre vertedouros livres;

Q_s : vazão adimensional para escoamento sobre vertedouros submersos;

Q_w : vazão sobre o vertedouro (m^3/s);

V : velocidade do escoamento sobre vertedouros submersos (m/s);

B : largura do canal (m);

h : carga hidráulica sobre o vertedouro livre (m);

d : espessura da linha d'água sobre o vertedouro submerso (m);

S_0 : declividade do fundo do canal (m/m);

L : comprimento da piscina ou tanque (m).

Se considerarmos Δh como sendo a diferença de altura de lâmina d'água entre duas piscinas adjacentes e g a aceleração da gravidade, a velocidade máxima do escoamento sobre o vertedouro será dada por (Larinier, 2002):

$$V = \sqrt{2g\Delta h} . \quad (3.13)$$

Para diferenças (Δh) de 0,15 m teremos uma velocidade média de 1,7 m/s e para 0,45 m de diferença, velocidade média de 3 m/s.

Desse modo, Δh será selecionado em função da capacidade natatória ou da capacidade de saltar das espécies alvo.

Uma pequena mudança na forma do vertedouro pode ser capaz de alterar a condição de escoamento. A transição entre os dois tipos de escoamento é instável e caracterizada por uma notável histerese. Essa instabilidade hidráulica pode ser prejudicial para algumas espécies de peixes. A vazão adimensional de transição, Q_t , usada para calcular a descarga na transição entre os escoamentos é dada por (Katopodis, 1992):

$$Q_t = \frac{Q_w}{BS_0 L^{1,5} \sqrt{g}} = 0,25, \quad (3.14)$$

em que:

Q_t é a vazão adimensional de transição;

Q_w é a vazão sobre o vertedouro;

B é a largura do canal da escada;

L é o comprimento da piscina;

g é a aceleração da gravidade;

S_0 é a declividade do fundo do canal.

Kim (2001) encontrou valores para Q_t entre 0,2 e 0,27. A partir deste valor o regime de escoamento na escada passa a ser sobre vertedouros submersos.

O escoamento sobre vertedouros submersos não fornece impulso hidráulico suficiente para que os peixes possam saltar para transpor a escada, no entanto, este tipo de escoamento é útil para peixes que não têm a capacidade de saltar, mas podem vencer altas velocidades.

A diferença de altura recomenda entre piscinas é de aproximadamente 30 cm para peixes como o salmão e a truta, capazes de saltar. Nos outros casos uma diferença de 75% desta altura é recomendada. A maioria das escadas Piscina Vertedouro tem declividade de 10% e são sensíveis à mudança de nível d'água. A faixa de variação de nível d'água com a qual ela é capaz de operar é estreita, sendo necessário, por vezes, o uso de algum sistema de controle de vazão para viabilizá-la.

Caso exista um orifício nos vertedouros (Figura 5), o escoamento deve ser considerado como (Katopodis, 1992):

- a) do tipo Slot Vertical para $y_0 < z_0$,
- b) um jato submerso para $y_0 > 2z_0$ ou
- c) um jato livre para profundidades onde apenas o lado de montante está submerso.

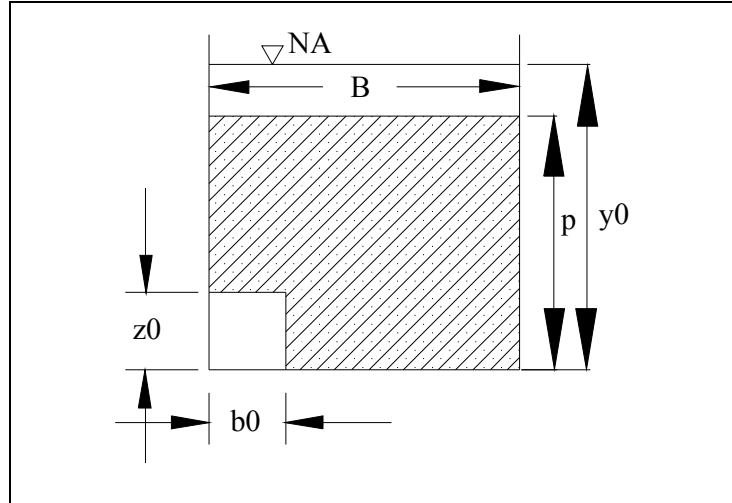


Figura 3.17. Detalhe de vertedouro dotado de orifício retangular.

A seguir (Tabela 3.2) é mostrado um resumo das vazões adimensionais para uma configuração padrão de escada tipo piscina vertedouro com orifício, com as seguintes dimensões:

$$z_0 = b_0, L = (6a10)b_0, B = (5a10)b_0 \text{ e } p = (3,5a4)b_0.$$

Tabela 3.2. Resumo das vazões adimensionais para uma configuração padrão de escada tipo piscina vertedouro com orifício.

Escoamento através de Orifícios		
Profundidade d'água	Equação que o escoamento segue	Tipo de escoamento similar a:
$y_0 < z_0$	$Q_{\text{jato}} = 1,94 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$ (3.16)	Slot Vertical
$y_0 > 2z_0$	$Q_{\text{jato}} = 2,25$ (3.17)	Jato Submerso

Nessas equações:

Q_{jato} é a vazão adimensional para jato submerso;

$Q_{\text{orifício}}$ é a vazão pelo orifício;

y_0 é a profundidade da lâmina d'água;

p é a altura do vertedouro;

z_0 é a altura do orifício;

b_0 é a largura do orifício.

Quando o vertedouro possui orifício, a vazão total passando pela escada é a soma da vazão sobre o vertedouro mais a vazão que passa pelo orifício, ou seja: $Q = Q_w + Q_{\text{orifício}}$.

Uma escada do tipo piscina vertedouro não é adequada para barramentos que apresentem um funcionamento irregular em termos de vazões e níveis.

3.1.1.3 Escadas tipo Canal Natural

Esse tipo de escada simula um curso d'água natural que liga a seção de jusante e montante do barramento ou obstáculo. A velocidade no canal é pequena e a dissipação de energia ocorre pela rugosidade do fundo e por uma série de obstáculos colocados ao longo do canal de forma a promover a dissipação.

Como a declividade desse tipo de estrutura deve ser muito pequena, torna-se difícil o posicionamento da entrada próximo à obstrução, o que seria a condição ideal (Larinier, 2002).

Escadas desse tipo podem ter obstruções colocadas em espaçamentos regulares, em forma de pequenos vertedouros, como no exemplo da escada de peixes da barragem de Itaipu (Figura 3.18).



Figura 3.18. Escada de peixes do tipo Canal Natural da Barragem de Itaipu, formada por obstruções a espaçamentos sucessivos: (a) vista aérea e (b) detalhe do canal.

Fonte: Itaipu, 2005.

Outra variação desse tipo de escada é formada por obstruções colocadas ao longo de todo o canal, sem um espaçamento rígido (Larinier, 2002), como no exemplo da pequena escada do Rio Williams, na Austrália (Figura 3.19). Essas obstruções podem ser formadas por pedras, fixadas ou não por cimento ou outro material. A vantagem de se fixar os materiais de fundo é a dificuldade que será criada para o escoamento carregá-los.



Figura 3.19. Escada de peixes do tipo Canal Natural em Bandon Grove, no Rio Williams, Austrália.

Esse tipo de estrutura é adequado para obstáculos naturais ou para pequenas barragens.

4.4.2.1 Escadas tipo Ranhura Vertical

A estrutura de passagem do tipo ranhura vertical (ou slot vertical) consiste em um canal retangular dotado de septos e ranhuras. Escadas do tipo ranhura vertical simples são formadas por dois septos e uma ranhura, como é mostrado na Figura 3.20. Escadas do tipo ranhura vertical dupla são formadas por três septos e duas ranhuras.

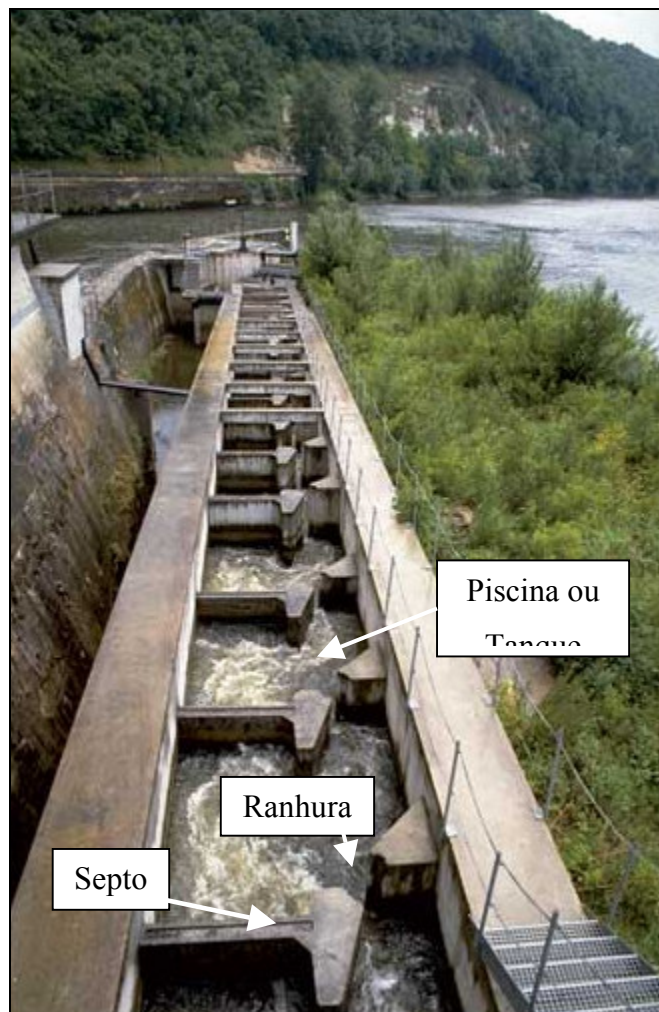


Figura 3.20. Foto de um canal de transposição do tipo Ranhura Vertical, mostrando os pares sucessivos de septos e as piscinas decorrentes deles. Barragem de Mauzac, no Rio Dordogne (França).

Fonte: Larinier, 2002.

A água desce por esse canal através das ranhuras, de uma piscina a outra. Na passagem pelos septos o escoamento forma um jato, que terá parte de sua energia dissipada pela movimentação na piscina (ou tanque). Δh é a diferença de nível d'água entre duas piscinas adjacentes e está relacionado à dissipação de energia característica do canal, para uma determinada vazão. Como valores mais altos de Δh implicam em velocidades maiores no canal, a escada é projetada com certo valor de Δh em função da espécie alvo, ou seja, do tipo de peixe que irá passar por ela. Quanto menor o valor de Δh , mais fácil será, para o animal, a transposição (Larinier, 2002). Entretanto, menores valores de Δh e, por conseguinte, menores velocidades, exigem estruturas maiores para vencer o mesmo desnível.

Caso o escoamento na escada seja uniforme Δh é considerado como sendo o mesmo em todos os tanques e igual à diferença entre o nível mais a montante e o mais a jusante do canal, dividido pelo número de ranhuras (Rajaratnam et al., 1986).

Escoamentos em canais abertos são considerados uniformes se a lâmina d'água for a mesma ao longo das diferentes seções do canal. Nesse caso, o fluxo não é acelerado ou desacelerado, isto é, a força gravitacional é igual à força cisalhante (Chow, 1959). Em canais abertos, a água encontra resistência ao fluir. Esta resistência é contraposta pela força gravitacional agindo sobre a massa d'água, na direção do movimento. Um escoamento uniforme será desenvolvido se a resistência estiver em equilíbrio com as forças gravitacionais. A magnitude da resistência, quando outras características físicas do canal forem mantidas constantes, depende da velocidade do escoamento. Em um canal de transposição corretamente projetado a força gravitacional é igual à força cisalhante (Kamula, 2001).

No caso de uma escada de peixes, um valor constante para Δh implica em apresentar, em tanques sucessivos, uma mesma altura de lâmina d'água para um mesmo ponto em tanques sucessivos. Assim, também a altura da lâmina d'água imediatamente a montante do septo (y_u) e a lâmina d'água imediatamente a jusante dele (y_d) serão teoricamente as mesmas ao longo do canal. É importante salientar que, em escadas de peixes, o escoamento é considerado uniforme se considerarmos a média. A Figura 3.21 mostra o perfil de uma escada onde o Δh é constante, com y_u e y_d também constantes. y_0 é a altura média teórica dentro de um tanque.

Apesar dessas considerações, estudos em modelos de escadas do tipo ranhura vertical (Van der Vinne, Katopodis e Rajaratnam, 1986) demonstraram que Δh nem sempre é a mesma para todos os tanques, demonstrando a existência de escoamentos não uniformes neste tipo de estruturas.

O efeito da variação de nível (Δh) ao longo da escada na facilidade de passagem pelos indivíduos parece não ser bem compreendido, assim como o comportamento do jato nas piscinas e a circulação de água dentro delas. Com o intuito de entender o comportamento hidráulico de um tipo convencional de canal do tipo ranhura vertical Rajaratnam et al. (1986) estudaram experimentalmente o escoamento através de sete diferentes tipos de modelos de escadas desse tipo (Figura 3.21). Esse foi o primeiro estudo abrangente neste tipo de escada.

Como mostrado na Figura, o Modelo 1 é similar à escada de Hell's Gate Canyon, cuja forma é muito comum no Canadá e semelhante à estudada neste trabalho.

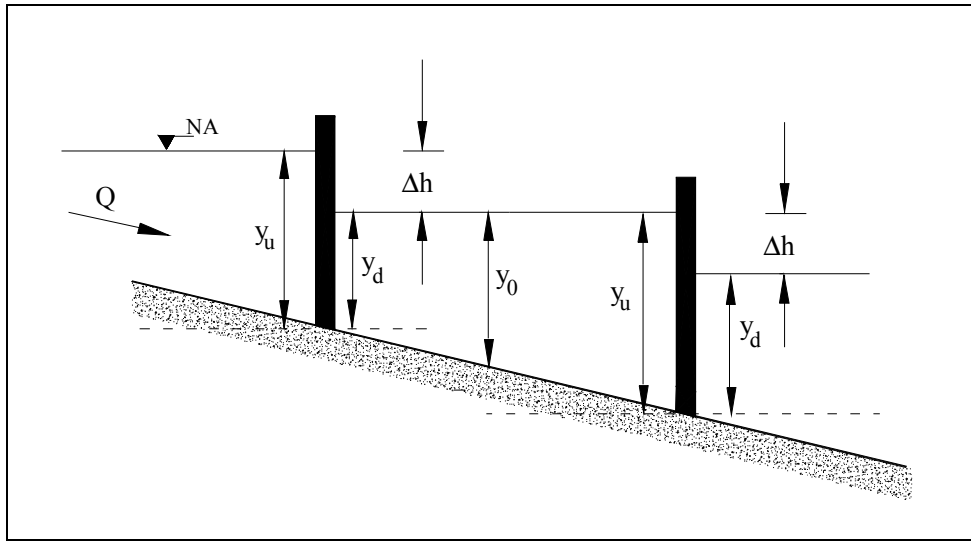


Figura 3.20. Representação de escoamento uniforme em uma escada de peixes do tipo ranhura vertical.

Os experimentos de Rajaratnam et al., 1986, foram realizados em um canal de 0,46 m de largura, em fundo de alumínio e laterais em plexiglass, com diferentes septos. A altura do canal era de 0,91 m e o comprimento de 5 m. A altura a montante da escada era controlada por uma comporta no final do modelo. A profundidade da água foi obtida ou com o uso de uma ponta linimétrica e com uma régua metálica, colocadas no centro dos tanques. A velocidade foi obtida com tubo de Prandtl de 2 mm de diâmetro externo.

No ano de 1989, Rajaratnam et al, continuaram seus experimentos com 11 modelos adicionais. O sistema de ensaios foi o mesmo, embora as dimensões do canal houvessem mudado: a largura interna do canal passou a ter 0,305 m, a altura 0,56 m e o comprimento 4,88 m. O número de tanques era 9 (Rajaratnam et al 1989, apud Katopodis 1992). O escoamento uniforme foi o único interesse nesse estudo.

Os testes foram realizados em declividades de 1%, 5% e 15%, com diferentes vazões. Baseados nos resultados os autores classificaram como satisfatório um projeto de uma escada tipo ranhura vertical com largura igual a $8b_0$ e um comprimento de $10b_0$ para os tanques. No entanto, variações secundárias podem ser feitas nessas dimensões sem afetar seu desempenho (Katopodis, 1992).

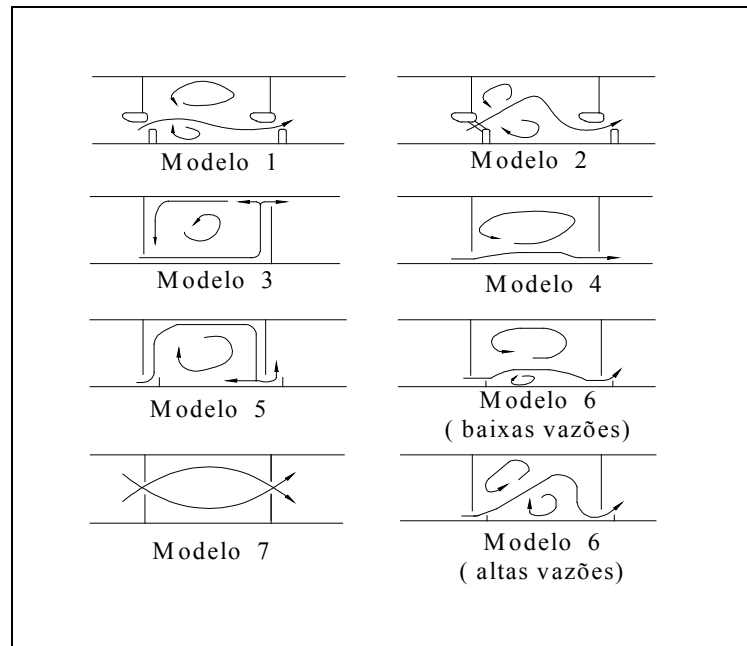


Figura 3.21. Representação dos modelos de ranhuras estudadas por Rajaratnam et al. (1986) e do padrão de circulação da água que cada um deles forma.

Uma vez desenvolvido o escoamento uniforme em uma escada, é possível representá-lo como sendo formado por uma profundidade teórica y_0 constante e, em decorrência disso, fazer algumas simplificações em relação às forças envolvidas no escoamento (Rajaratnam et al., 1986). Essas simplificações estão representadas na Figura 3.22.

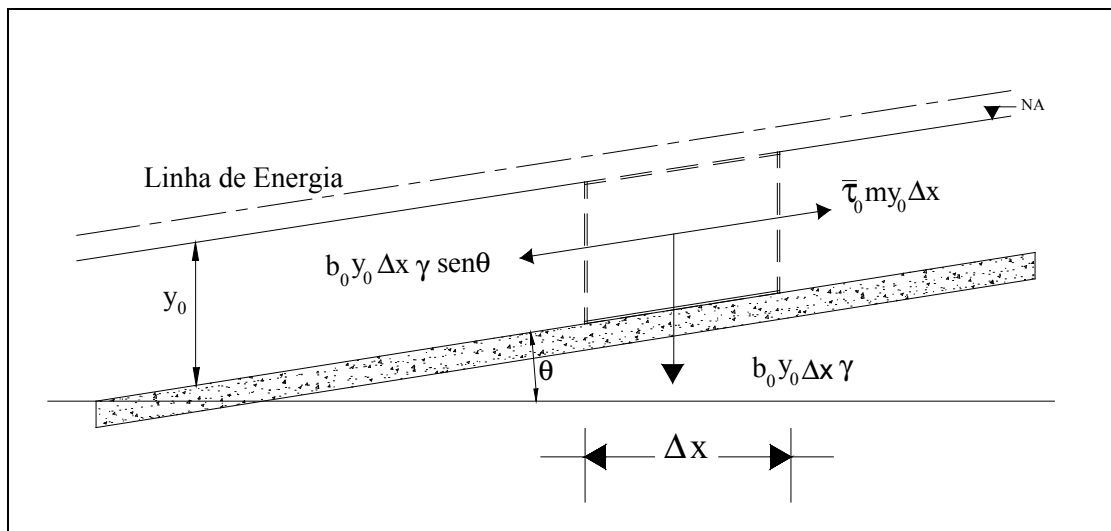


Figura 3.22. Representação das forças envolvidas em um escoamento uniforme.

Partindo dessas simplificações, aplicáveis para escoamentos uniformes, Rajaratnam et al. (1986), chegaram a expressões para alguns parâmetros hidráulicos.

Como o ângulo formado com a horizontal (θ) pode ser considerado muito pequeno (Figura 3.22), tem-se:

$$\text{sen } \theta \approx \text{tg } \theta \therefore \text{tg } \theta = S_0. \quad (3.18)$$

Igualando-se as forças gravitacionais e as de cisalhamento:

$$b_0 y_0 \Delta x \gamma S_0 = \bar{\tau}_0 m y_0 \Delta x, \quad (3.19)$$

b_0 , neste caso, é tratado com sendo aproximadamente a largura do jato na piscina; y_0 é a altura teoricamente constante da lâmina d'água, $\bar{\tau}_0$ corresponde à tensão cisalhante entre o jato que atravessa a ranhura e a massa d'água da piscina (a tensão cisalhante junto ao fundo passa a ser negligenciada pelo seu baixo valor relativo a $\bar{\tau}_0$); m representa a influência dos septos no escoamento, assumindo o valor $m=1$ ou $m=2$, para um ou dois septos por ranhura, respectivamente (Rajaratnam et al, 1986). Neste estudo cada ranhura é limitada por dois septos.

Por outro lado, a tensão cisalhante pode ser representada por:

$$\bar{\tau}_0 = C_f \frac{\rho V^2}{2}, \quad (3.20)$$

em que: C_f é o Coeficiente de cisalhamento e V é a velocidade característica (m/s).

Deste modo, tem-se que:

$$V^2 = \frac{2}{m} \frac{b_0 S_0 g}{C_f}, \quad (3.21)$$

ou seja:

$$C_f = \frac{2}{m} \frac{b_0 S_0 g}{V^2}. \quad (3.22)$$

A partir dessa equação é possível calcular uma vazão adimensional (Q_*), da seguinte forma:

$$Q_* = \frac{Q}{\sqrt{gS_0 b_0^5}} = \frac{y_0}{b_0} \sqrt{\frac{2}{mC_f}}. \quad (3.23)$$

Assim, caso C_f seja uma constante, então Q_* será uma função linear do parâmetro adimensional y_0/b_0 .

Para o Modelo 3 (Figura 3.21) Rajaratnam et al. (1986) relacionaram em um gráfico Q_* em função do parâmetro adimensional y_0/b_0 , para diferentes valores de declividades e escalas. O resultado pareceu mostrar uma relação linear, o que indicaria um valor para C_f aproximadamente constante.

Para o Modelo 3, a relação entre Q_* e y_0/b_0 foi descrita por:

$$Q_* = 2,84 \left(\frac{y_0}{b_0} \right) - 1,62. \quad (3.24)$$

Para o Modelo 5 a relação encontrada (que é muito próxima a do Modelo 3) foi:

$$Q_* = 2,67 \left(\frac{y_0}{b_0} \right) - 0,52, \quad (3.25)$$

Enquanto que, para o Modelo 1 (o mesmo tipo de septo do modelo deste estudo), a equação fica:

$$Q_* = 3,77 \left(\frac{y_0}{b_0} \right) - 1,11. \quad (3.26)$$

Um outro parâmetro, o coeficiente de descarga (C_d), também pode ser calculado a partir dessa simplificação (escoamento uniforme). O coeficiente de descarga para uma escada do tipo ranhura vertical foi definido por Clay (1961 apud Rajaratnam et al, 1986) como sendo:

$$C_d = \frac{Q}{b_0 \bar{y} \sqrt{2g\Delta h}} \quad (3.27)$$

Em canais de transposição, os principais fatores que afetam o coeficiente de descarga são (Kamula, 2001):

- I. A razão de contração transversal, que depende da razão b/B , em que "b" é a largura das ranhuras (distanciamento entre os septos) e "B" é a largura original do canal;
- II. A razão de contração longitudinal, que depende da razão b/L , em que "L" é a distância entre duas contrações adjacentes (ou seja, comprimento longitudinal do tanque);
- III. Número de Froude da contração (da seção de passagem contraída). Se o número de Froude da seção de passagem for maior que 0,8, velocidades aproximadamente críticas ou supercríticas devem ocorrer na seção;
- IV. A razão de submergência, que é a razão t/h , em que "t" é a lâmina d'água a montante da crista do vertedouro e "h" é altura d'água sobre o vertedouro (para escadas do tipo piscina vertedouro).

Rajaratnam et al., (1986), demonstraram o padrão de circulação da água dentro de piscinas de escadas do tipo ranhura vertical. O resultado da circulação para o Modelo 1 (Figura 3.21) está representado, de forma simplificada, na Figura 3.23.

Na UHE de Igarapava, no Rio Grande, em Minas Gerais, Viana (2005) mediu valores de velocidades médias horizontais em 9 planos paralelos ao fundo do tanque. A cada plano eram formadas matrizes de 14x15 pontos, perfazendo um total de 210 pontos medidos a cada plano. Com base nestes valores de velocidade foi possível ao autor mapear o campo de velocidades para cada um desses planos (Figura 3.24) e assim descrever o padrão de circulação da água dentro do tanque, que mostra um fluxo de altas velocidades aproximadamente central e recirculações à esquerda e à direita. O resultado do mapeamento gerado no protótipo em Igarapava foi muito próximo ao encontrado por Rajaratnam et al. (1986).

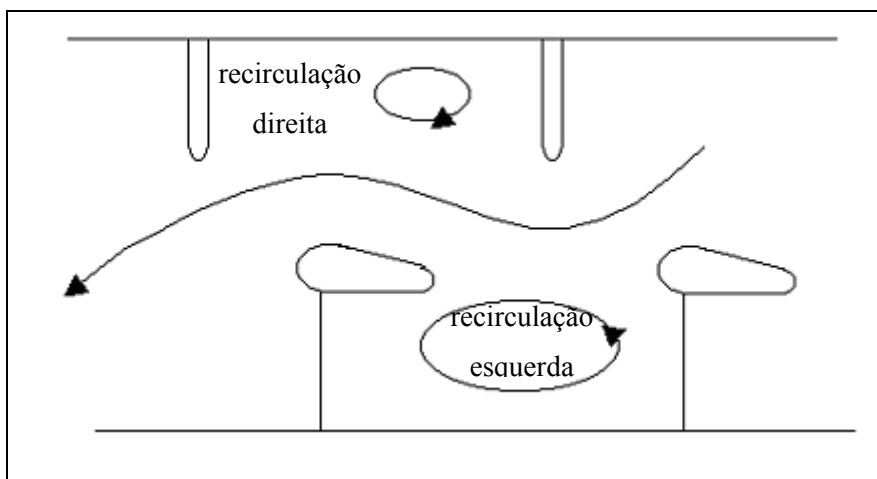


Figura 3.23. Representação simplificada do padrão de circulação
(Rajaratnam et al., 1986).

Viana (2005) também constatou um padrão que denominou de “enchimento e esvaziamento” no tanque, sendo que, na região de recirculação à esquerda, a lâmina d’água aumenta em 20 cm a partir de uma lâmina inicial de aproximadamente 1,90 m. A onda observada atinge sua altura máxima em 40 s e o processo de descarga ocorre em 10 s. Ao final do período de ascensão da onda, a “parede hidráulica”, formada pelo fluxo principal, é rompida nos planos inferiores. O autor concluiu que o rompimento nos planos inferiores é devido ao fato de eles estarem submetidos a uma maior pressão e por apresentarem velocidades mais baixas.

O mesmo autor também realizou estudos em um modelo reduzido (escala 1:20) da mesma estrutura. Esse estudo compreendia, entre outras coisas, a geração de mapas de distribuição de velocidades médias para o modelo e a comparação entre os resultados de campo e os obtidos em laboratório (modelo reduzido).

Kamula (2001) realizou medidas de velocidades em três diferentes tipos de escadas de peixes (ranhura vertical, piscina vertedouro e Denil) e constatou que, para um canal do tipo ranhura vertical, as velocidades no jato foram as mais altas, se comparadas às dos outros tipos.

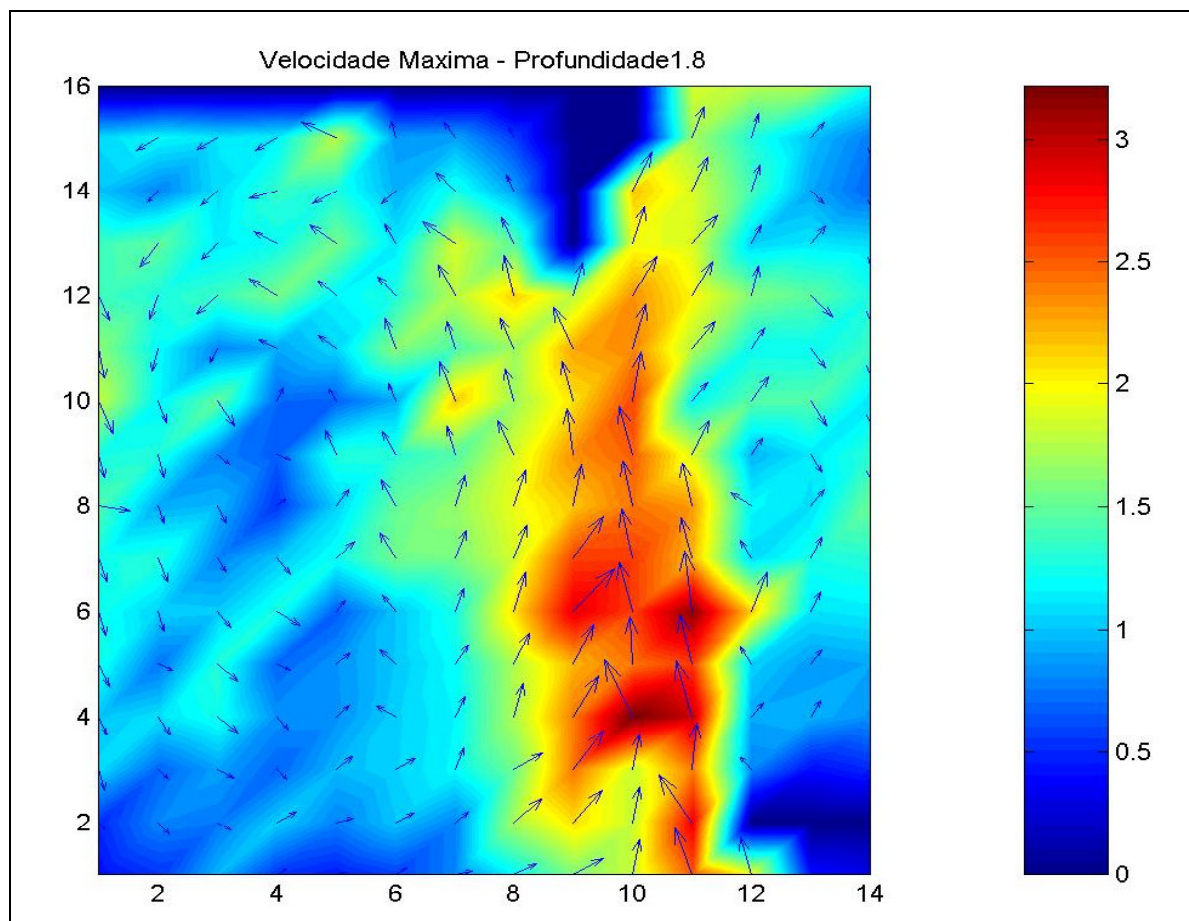


Figura 3.24. Mapeamento de velocidades para 10 cm abaixo da linha d'água (Viana, 2005).

Kamula (2001) também estudou a distribuição de velocidades na seção transversal e verificou que o jato estava direcionado no centro da massa d'água, sendo que as mais altas velocidades foram encontradas diretamente à jusante do septo e quase seguindo uma linha reta. O autor concluiu que as variações nas máximas velocidades dos três diferentes tipos se devem ao caráter tridimensional do escoamento, sendo que, em escadas do tipo piscina vertedouro e Denil, este se apresenta vastamente difuso na seção transversal, enquanto que, para o tipo ranhura vertical, ele está concentrado em uma área restrita da seção.

Kamula (2001) considera o escoamento em canais de transposição como sendo governado pela sua geometria. O autor afirma ser o escoamento, dentro dessas estruturas, permanente e, apenas por aproximação teórica, pode ser considerado uniforme. O que acontece, segundo o autor, é que a dissipação de energia gerada pelos septos, pelos defletores ou pelos pequenos vertedouros forma elementos turbulentos em larga escala dentro do canal. Mas, caso estes elementos sejam dissipados após uma pequena distância, gerando um escoamento desenvolvido, o fluxo no canal pode ser considerado uniforme. O escoamento, neste caso, é completamente desenvolvido na parte média do canal, onde a declividade média da linha de

energia, a declividade média de fundo e o perfil médio da superfície da água são iguais. Nessa situação em particular é possível o uso de equações e procedimentos desenvolvidos para escoamentos uniformes, como as equações anteriormente descritas.

Em estudos experimentais foi observado que, após uma pequena distância a jusante dos obstáculos dissipadores de energia, o escoamento fica completamente desenvolvido e, até mesmo em canais do tipo piscina vertedouro, a profundidade da linha d'água é a mesma, quando medida em pontos iguais (Rajaratnam et al., 1992).

4 Metodologia

Este capítulo aborda a metodologia utilizada para se conhecer o funcionamento de uma escada para peixes do tipo ranhura vertical. Para tanto se fez necessária a construção da estrutura de laboratório referente ao protótipo, que se encontra na UHE de Igarapava, em Minas Gerais.

4.1 Características do protótipo

A escada para peixes de Igarapava foi projetada para uma dissipação máxima de energia de 145 W/m^3 . A adoção desse critério resultou na faixa de variação dos parâmetros de projeto descrita na Tabela 4.1, para cada uma das condições de operação previstas.

Tabela 4.1. Variáveis de projeto esperadas para a estrutura de Igarapava.

Parâmetro	Condição de Operação	
	Mínima	Máxima
Vazão (m^3/s)	1,37	1,63
Lâmina Média (y_0) (m)	1,99	2,35
Dissipação de Energia Máxima (W/m^3)	144	145

(Fonte: Consórcio da UHE de Igarapava, Projeto Executivo, 1998).

O tipo de estrutura escolhida (ranhura vertical) foi, principalmente, em função da faixa de variação de nível d'água no canal de entrada da escada.

A escada de Igarapava (Figura 4.1) possui 282 m de extensão e uma declividade de 6%, um canal de entrada com 16,6m de extensão e cota de piso na elevação 493 m e um canal de saída de 27 m e cota de piso na elevação 509,7 m. O desnível que a estrutura alcança, portanto, é de 16,7 m. A cota do reservatório da usina para nível d'água máximo normal é de 512 m, com uma amplitude de variação esperada em torno de 0,20 m.

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.

A escada 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 tornaria as condições dentro dos tanques menos favoráveis. Vazões muito altas no canal de transposição trariam como consequência velocidades mais altas, o que tornaria a permanência nos tanques e a transposição pelas ranhuras mais difícil para o animal e o canal seria mais seletivo.



Figura 4.1. Vista aérea da escada para peixes da UHE Igarapava.
Fonte: Magalhães (2004).

4.2 Características do modelo reduzido

Este estudo foi realizado em um modelo físico reduzido, construído junto ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O modelo é referente à Escada de Peixes do tipo Ranhura Vertical da UHE de Igarapava, no estado de Minas Gerais, e foi construído em escala 1:20. O critério para a escolha da escala foi com base no espaço total e na capacidade de bombeamento de que dispúnhamos no laboratório, bem como os custos envolvidos em sua construção, sendo essa escala capaz de reproduzir satisfatoriamente os principais fenômenos estudados no escoamento, entre eles o escoamento uniforme.

Pelo fato do estudo se dar sobre um escoamento à superfície livre, a Lei de Modelos de Froude foi escolhida para realizar-se a redução do modelo em escala. A lei de Froude correlaciona as forças gravitacionais e inerciais, mais importantes nesse tipo de escoamento.

O Modelo de Froude exige similaridade geométrica e igualdade do número de Froude entre o modelo e o protótipo. Desta forma podem ser feitas as seguintes relações entre características de modelo e de protótipo:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\lambda} \quad (4.1)$$

$$\frac{Q_p}{Q_m} = (\lambda)^{5/2} \quad (4.2)$$

$$\frac{q_p}{q_m} = (\lambda)^{3/2} \quad (4.3)$$

Sendo: λ a relação entre a dimensão linear do protótipo pela dimensão linear do modelo, V_p e V_m as velocidades, Q_p e Q_m as vazões e q_p e q_m as vazões específicas, do protótipo e do modelo, respectivamente, para os itens citados.

Na Tabela 4.2 são apresentadas algumas características do modelo e do protótipo. Essas características seguem as relações acima descritas.

Tabela 4.2. Resumo das características físicas do modelo experimental e do protótipo.

Característica	Modelo	Protótipo
Escala	1:20	1:1
Declividade do canal	6%	6%
Número de tanques	26*	187
Largura dos tanques (m)	0,15	3,00
Comprimento dos tanques(m)	0,15	3,00
Largura das Ranhuras (abertura) (m)	0,02	0,40

*apenas um trecho da estrutura foi representado em laboratório.

O modelo foi construído em vidro e acrílico, sobre uma estrutura metálica. A escolha por vidro e acrílico foi feita devido à necessidade de visualização do escoamento.

A estrutura completa do modelo é composta por um reservatório de montante, o canal dotado de septos que formam os tanques, um conduto que deságua próximo à entrada da escada, chamado de sistema auxiliar, um trecho de canal que simula o trecho do rio a jusante e uma

comporta no final do canal, que verte água para o reservatório inferior. Ainda fazem parte do sistema uma bomba, um medidor eletrônico de vazão, um inversor de frequência e um reservatório inferior. O desenho representando a estrutura de ensaio pode ser vista na Figura 4.2, onde aparecem indicados os sentidos de escoamento para cada parte da estrutura.

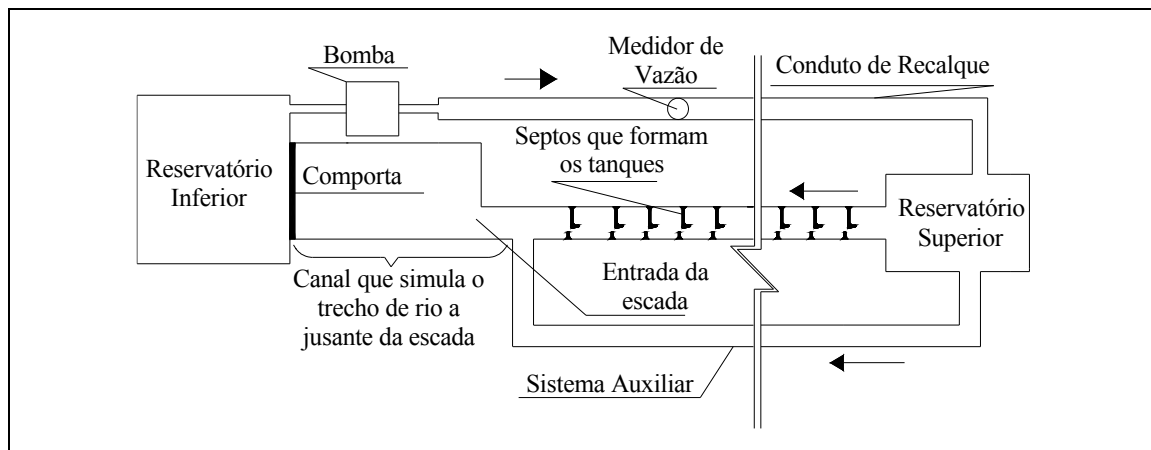


Figura 4.2. Representação simplificada do modelo.

A Figura 4.3 é uma fotografia do modelo, com detalhes mostrando a entrada da escada e o reservatório superior.

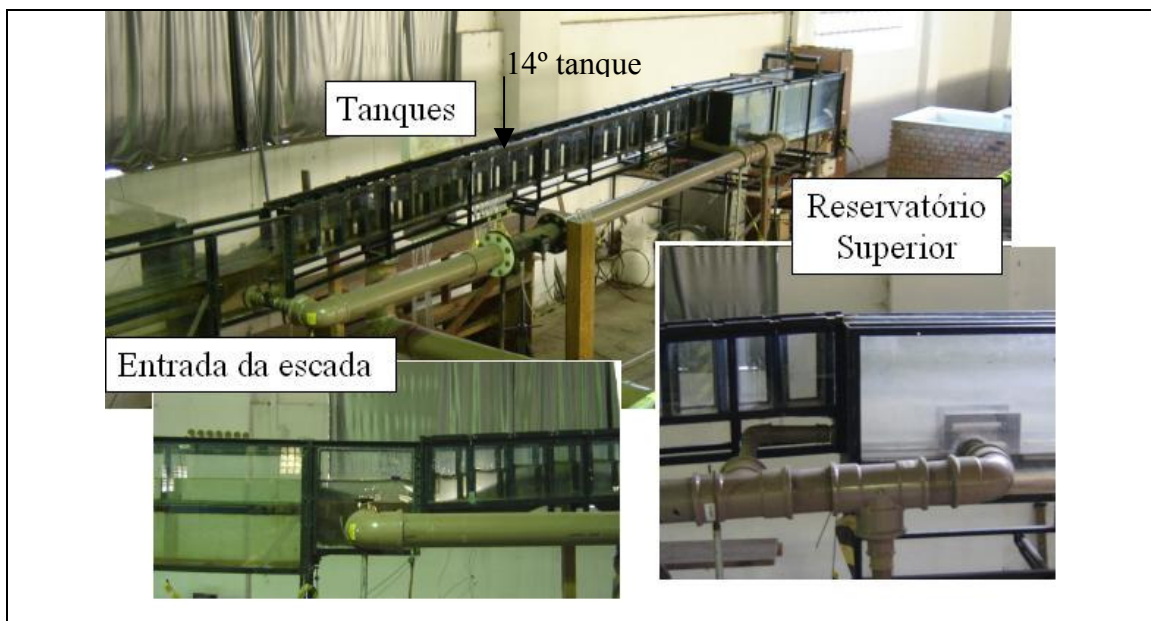


Figura 4.3. Foto do modelo com detalhe da entrada e do reservatório superior.

O sistema auxiliar ou sistema de atração é formado por um conduto de 100 mm de diâmetro que capta água do reservatório de montante e deságua na entrada da escada. Nos ensaios realizados para este estudo não foi utilizado o sistema de atração, uma vez que não foram

realizados testes na entrada da escada. A entrada da escada será estudada em trabalhos posteriores na mesma estrutura.

A comporta foi usada para regular o nível de jusante que garantisse vazão e lâmina d'água iguais às encontradas no protótipo.

A instalação de recalque é abastecida por uma bomba KSB Hydrobloc C 700. O medidor eletromagnético de vazão fica instalado no duto que recalca água para o modelo. A instalação de recalque também possui um inversor de frequência, que permite controlar a rotação com que o motor da bomba opera.

No modelo foram construídos 26 tanques. A abertura entre os septos (ranhura) é de 2 cm e o distanciamento entre o centro de dois septos adjacentes é de 16 cm, o que corresponde a um comprimento para cada tanque igual a 15 cm. Na Figura 4.4 estão representadas, sobre uma foto do modelo estudado, as dimensões dos tanques.

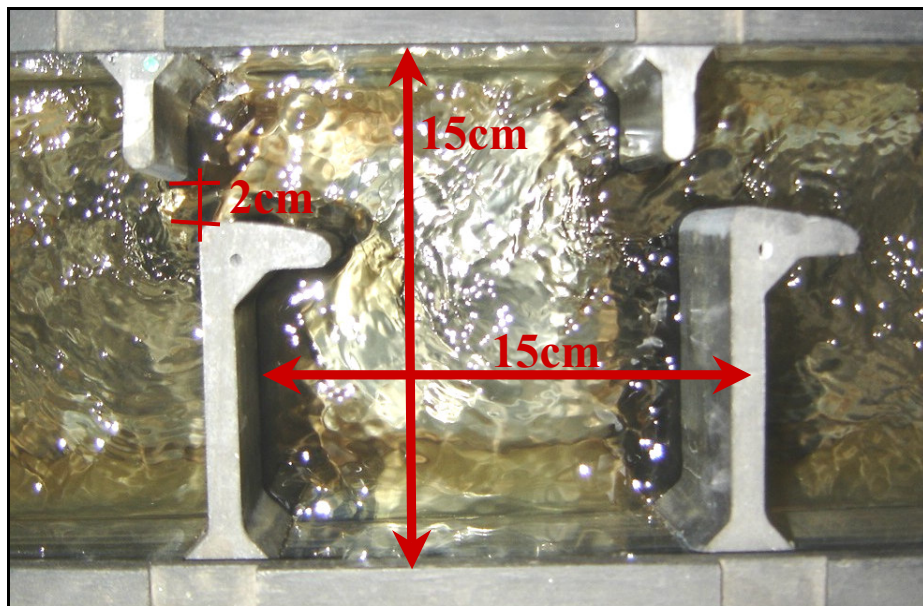


Figura 4.4. Fotografia mostrando as dimensões dos septos.

No modelo, as vazões de projeto para a escada de Igarapava corresponderiam aos valores mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Variáveis de projeto correspondentes à estrutura de Igarapava no modelo em escala 1:20.

Parâmetro	Condição de Operação	
	Mínima	Máxima
Vazão (l/s)	0,77	0,91
Lâmina Média (y_0)(cm)	9,95	11,75
Dissipação de Energia Máxima (W/m^3)	38,00	45,00

4.3 Ensaios Realizados

Neste estudo foram realizados dois tipos de ensaios experimentais: ensaio tipo A e ensaio tipo B. No primeiro tipo (ensaio tipo A) foram realizadas leituras de algumas características do escoamento (velocidade média, altura da lâmina d'água e pressão de fundo) em diversos pontos dentro de um mesmo tanque da escada e feita a visualização do escoamento com o uso de um traçador. Essas leituras deram origem a mapas de distribuição dessas características. Este ensaio (tipo A) foi realizado para uma mesma vazão. No segundo tipo (ensaio tipo B) foram registradas alturas de lâmina d'água para diferentes vazões.

4.3.1. Ensaio tipo A – Mapeamento de características do escoamento

Realizado em vazão constante, este tipo de ensaio visou a obtenção de mapas de distribuição de velocidade média, de pressão no fundo do tanque e de altura de lâmina d'água. Os mapas de velocidade e de altura de lâmina d'água foram gerados para o tanque de número 14 e os mapas de pressão para o tanque de número 15. O mapeamento de velocidades foi feito no tanque de número 14 devido aos orifícios no fundo do 15°, necessários à instalação de piezômetros e transdutores de pressão. Também no tanque de número 14 foram feitas as visualizações do escoamento.

4.3.2. Condição de operação para o ensaio Tipo A

Apesar da estrutura em estudo ter sido projetada para vazões variando entre 1,37 e 1,63 m³/s, Viana (2005), na aquisição de velocidades realizada no ano de 2003, quando mapeou o campo de velocidades médias encontradas em um dos tanques da escada da UHE Igarapava, registrou uma vazão de apenas 1,21 m³/s.

A condição de ensaio Tipo A procurou reproduzir a condição desse ensaio efetuado no protótipo por Viana (2005). O mesmo autor realizou ensaios em laboratório nessa mesma condição, em um modelo construído em escala 1:20. Esse modelo também seguiu a Lei de Modelos de Froude e foi construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Na Tabela 4.4 estão apresentados os valores de vazão e de lâminas d'água encontrados por Viana em sua aquisição de dados no protótipo e seus valores correspondentes para o modelo ensaiado neste estudo (escala 1:20).

Tabela 4.4. Condição de operação descrita por Viana (2005). Valores para o protótipo e sua relação para o modelo (escala 1:20).

Parâmetro	Protótipo	Modelo em escala 1:20
Vazão (l/s)	1210,00	0,68
Lâmina Média (y_0)(cm)	190,00	9,50
Carga hidráulica por defletor (Δh) (cm)	19,00	0,95
Dissipação de Energia Máxima (W/m^3)	141,50	3,02

Como os ensaios realizados neste estudo seguiram as mesmas condições de vazão e altura d'água dos ensaios realizados por Viana (2005), os mapas de velocidades médias, gerados a partir dos valores obtidos em nosso modelo, serão comparados aos mapas gerados com os valores de protótipo.

Ao realizar os estudos sobre a distribuição de velocidades médias na Escada para Peixes da UHE de Igarapava, Viana (2005) afirmou ter realizado suas aquisições em um tanque livre de efeitos de remanso, ou seja, em um tanque que apresentava escoamento uniforme. Neste estudo também consideramos o escoamento como sendo uniforme nos tanques onde foram realizados os ensaios, como será mostrado no Capítulo 5.

4.3.2.1 Visualização do escoamento

No tanque de controle (14º tanque da escada) (Figura 4.3) foram feitas visualizações com o uso de traçadores. Os primeiros traçadores usados se mostraram inadequados devido à grande turbulência do escoamento. Após inúmeras tentativas, o traçador escolhido para a

visualização foram esferas de PEAD (Polietileno de Alta Densidade), de densidade muito próxima à da água (densidade igual a 1, com uma variação de 0,006 para mais ou para menos, segundo o fabricante).

Os registros das imagens foram feitos por duas filmadoras, fixadas perpendicularmente ao canal, uma junto à parede lateral e outra junto ao fundo, para que se pudesse fazer tomadas simultâneas no tanque de controle.

Junto às paredes do canal foram desenhadas duas malhas (uma na parede lateral e outra no fundo). A mesma malha foi impressa em papel e, assistindo-se a filmagem, a cada cena era anotada a posição do traçador manualmente. Realizadas as anotações do traçador, foi possível mapear a trajetória do traçador em dois planos. Este mapeamento foi digitalizado e, com o uso do programa IDL (Interface Definition Language), foi possível determinar a trajetória do traçador em 3 dimensões.

4.3.2.2 Aquisição dos dados de velocidade média

Para a aquisição dos dados de velocidade média foi criada uma malha de pontos, onde seria posicionado o micromolinete. O posicionamento dos pontos de aquisição de velocidade pode ser visto na Figura 4.5.

Para o posicionamento do micromolinete dentro do canal foi construído um equipamento capaz de se deslocar transversal e longitudinalmente em relação ao canal. O equipamento foi construído em madeira e permitia que o micromolinete fosse posicionado também em diferentes alturas dentro do canal. A posição de cada ponto era verificada em duas réguas, que ficavam junto ao canal, uma relativa ao eixo y (transversal ao canal) e outra relativa ao eixo x (no sentido longitudinal do mesmo). A distância vertical (eixo z) era medida por uma régua junto à haste do micromolinete.

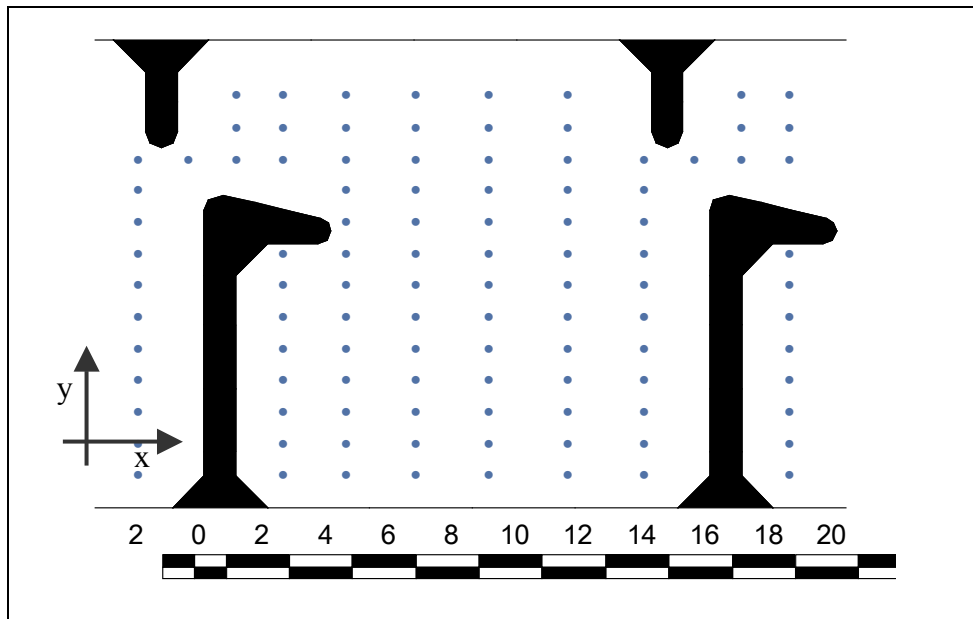


Figura 4.5. Posicionamento horizontal dos pontos de aquisição de velocidade média.

A escala está apresentada em centímetros.

No ensaio foram definidos 3 planos horizontais de aquisição dentro do 14° tanque do modelo. Na Figura 4.6 estão representados esses planos. A distância entre eles é de 2 cm, assim, os planos foram obtidos a 2, 4 e 6 cm de distância do fundo do canal.

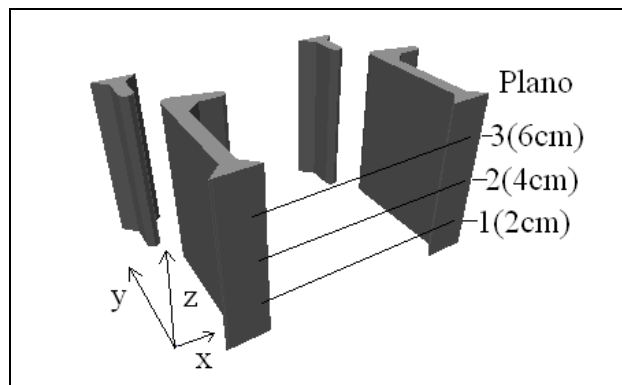


Figura 4.6. Planos de aquisição de dados de velocidade média.

O micromolinete usado no experimento é do tipo capacitivo, cuja hélice possui 5 pás. A hélice é capaz de girar livremente, sem tocar na envoltória que a cerca. Interior à haste metálica está um fio condutor interno isolado. Sua função é detectar a variação capacitiva devido à passagem das pás do micromolinete. Como não existe contato entre o fio condutor e as pás da hélice, é possível detectar baixas velocidades do fluido. A variação capacitiva passa por um condicionador de sinal, gerando então uma saída em pulsos, que é registrado por um data-logger acoplado a ele.

Em cada ponto de aquisição era registrado um total de 200 valores de velocidade (relativo a um tempo de aproximadamente 2 minutos). O programa de aquisição do registrador gerava um arquivo de dados com esses 200 valores no formato ASCII, que eram transportados para um arquivo texto e então calculadas as médias das velocidades, para cada ponto, no programa MatLab (Figura 4.7).

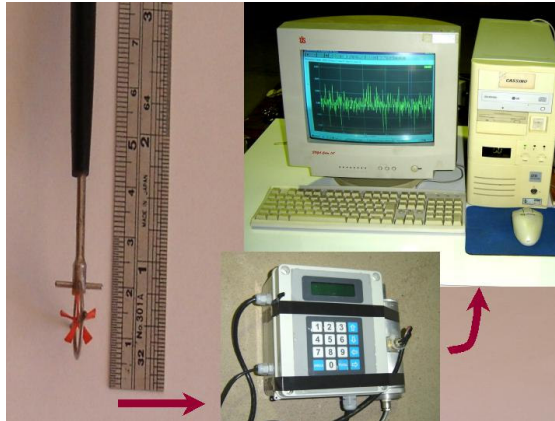
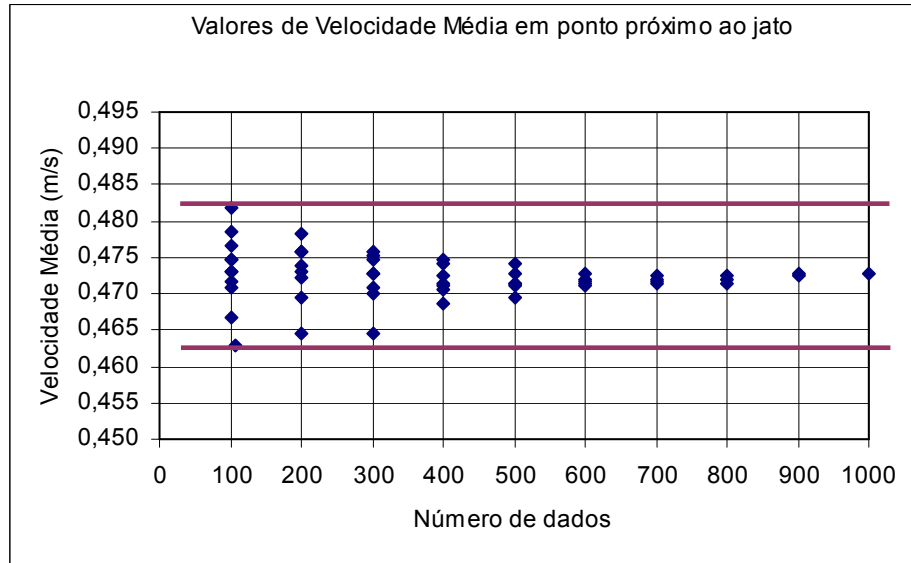


Figura 4.7. Micromolinete, registrador de dados e microprocessador utilizados nos ensaios de velocidade média.

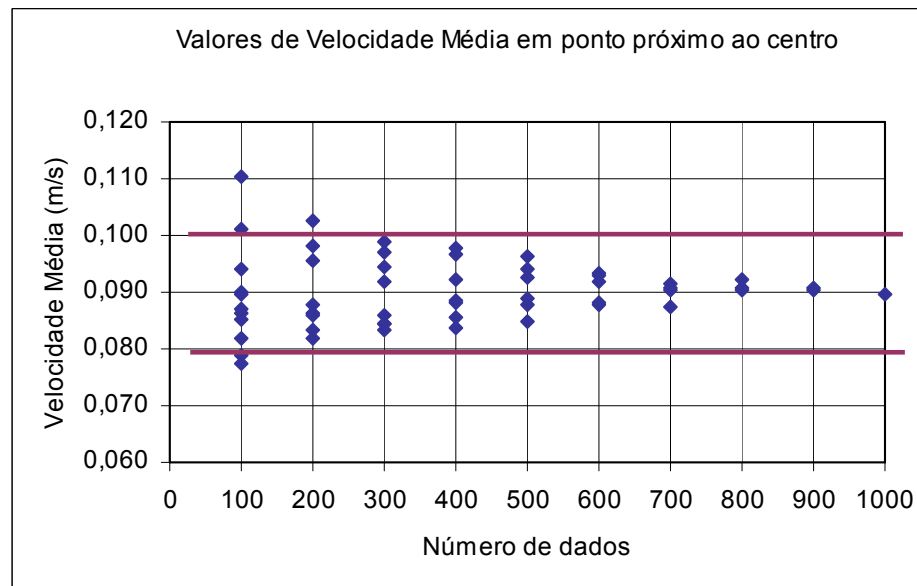
O valor de velocidade foi medido, em cada um dos pontos, no sentido da sua maior componente. A direção dessa componente, em cada ponto, foi verificada no display do registrador de dados, caracterizada pelas maiores velocidades. Também era possível confirmar a direção do fluxo preferencial com o uso de uma linha amarrada à haste do molinete, que servia como indicação do mesmo.

Na estrutura de fixação do molinete foi acoplada uma referência para medir-se o ângulo de inclinação desse. Assim, cada ponto foi caracterizado por um ponto de coordenadas x , y e z e um ângulo, com duzentos valores de velocidades lidos pelo data-logger para posterior cálculo da média.

Como parâmetro de verificação do número adequado de dados para representar a velocidade média em cada ponto, foi usada a velocidade média calculada a partir de uma amostra de 1000 valores. Para dois pontos distribuídos no tanque foi calculada a média sobre a amostra com intervalos de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 e 900 valores. Também foram calculados os erros relativos de cada uma dessas médias em relação à de 1000 valores. Os gráficos mostrando a dispersão destes valores em dois pontos distribuídos no tanque estão mostrados a seguir (Figura 4.8). Na mesma figura está representada a faixa de precisão do aparelho, que é de aproximadamente 2 cm/s.



(a)



(b)

Figura 4.8. Variação dos valores de velocidade média para diferentes tamanhos de amostras (a) em um ponto próximo ao jato e (b) em um ponto próximo ao centro do tanque e faixa mostrando a precisão do instrumento.

Devido ao fato de, na região central do tanque, existirem correntes em direções diversas, o erro de medida do valor da velocidade média calculada com 200 pontos é maior em relação a um ponto de aquisição próximo ao jato, onde a direção da velocidade está bem definida. Neste local, o erro percentual em relação à média de 1000 pontos foi de aproximadamente 3%.

Velocidades muito próximas à parede (distância menor que o raio do molinete) não foram possíveis de serem medidas. A solução foi gerar pontos nesses locais, não cobertos pelo

micromolinete, com o uso de interpolação, o que deu uma idéia aproximada da distribuição de velocidades no entorno dos septos e junto às paredes.

Para a interpolação foi usada a noção de camada limite gerada por uma placa plana, uma vez que, por aproximação, na abertura, o septo se comporta como uma placa plana no sentido do escoamento, pois o vetor velocidade nessa região se apresenta com ângulo nulo ou praticamente nulo em relação ao perfil do septo. Para a análise da espessura da camada limite o escoamento é considerado incompressível e o ângulo de ataque é considerado nulo em relação à parede. As paredes foram consideradas como placas infinitas e as velocidades V_0 , próximas a elas, constantes ao longo do escoamento.

O escoamento na camada limite é formado na fronteira do escoamento com superfícies sólidas, onde ocorrem tensões de cisalhamento altamente significativas. Essas tensões cisalhantes alteram o perfil de velocidades que o escoamento teria sem a presença da superfície sólida (Figura 4.9).

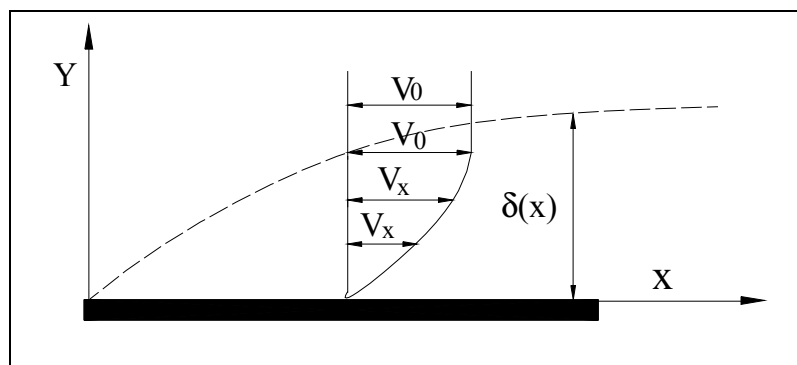


Figura 4.9. Representação do conceito de camada limite.

Para uma situação idêntica à encontrada próxima à ranhura do modelo (número de Reynolds inferior a 10^5), a espessura da camada limite laminar (δ) causada por uma placa plana, no ponto de abscissa x , com R_x definido como sendo o número de Reynolds local na abscissa x , é definida por (Schiozer, 1996):

$$\delta(x) = \frac{4,96x}{(R_x)^{1/2}}. \quad (4.4)$$

Fazendo-se esse cálculo para as condições do ensaio de velocidade, o valor da camada limite não ultrapassa 1,5 mm de espessura. Assim, como as velocidades sofrem influência da parede

apenas em uma região muito próxima a ela, os pontos interpolados não sofreram nenhuma redução.

4.3.2.3 Aquisição dos dados de pressão

Os valores de pressão foram obtidos com o uso de transdutores elétricos de pressão com o auxílio de piezômetros para a verificação dos valores médios.

Um transdutor elétrico de pressão é um aparelho que mede indiretamente a pressão à qual está submetido a partir da movimentação de uma membrana interna a ele. Um transdutor é capaz de transformar o impulso mecânico que deformou sua membrana em um impulso elétrico. Esse, por sua vez, passa por uma placa de aquisição de dados, cuja função é transformar o impulso elétrico em um valor que pode ser armazenado em um computador.

A placa responsável pela aquisição dos dados de pressão vindos dos transdutores possui 32 canais (modelo CAD12/32, fabricada pela Lynx). A Figura 4.10 representa o caminho que faz o sinal, desde o transdutor até o armazenamento em um microprocessador.

Para verificar a aferição dos transdutores de pressão foi usado um cavalete, cuja representação simplificada é mostrada na Figura 4.11.

Sobre este cavalete havia uma mangueira com água, submetida à pressão atmosférica em uma extremidade e ligado ao transdutor na outra. A pressão no transdutor é dada pela diferença entre a coluna (1) e o ponto em que o transdutor está conectado (2). A altura d'água presente na mangueira era medida por uma régua acoplada e fixa ao cavalete.

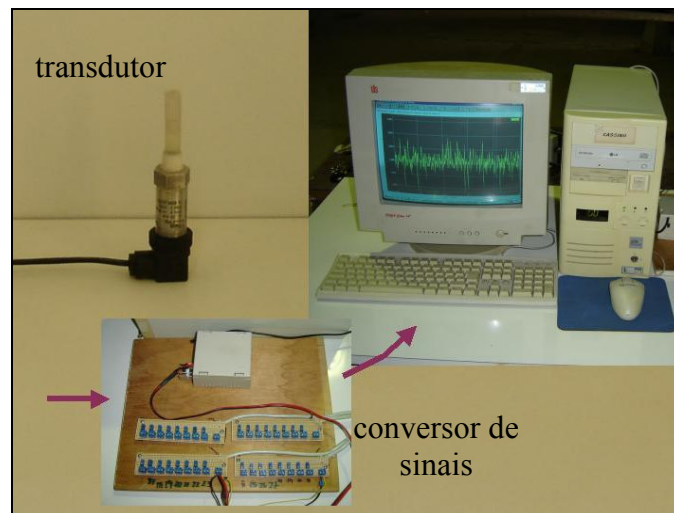


Figura 4.10. Fotos representando a seqüência para aquisição e armazenamento dos dados de pressão.

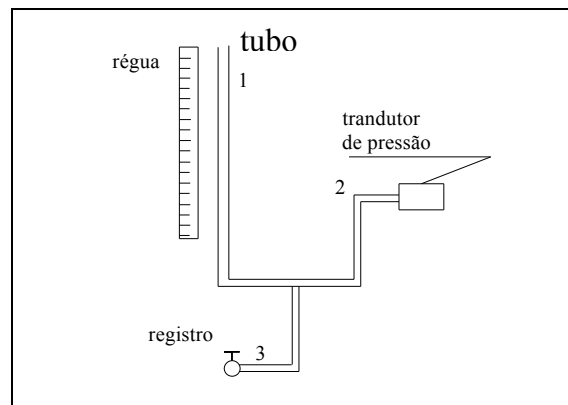


Figura 4.11. Representação do aferidor de transdutores.

Para construir a curva característica de cada aparelho foram usados 15 pontos (diferentes alturas d'água dentro do tubo). Para cada valor diferente e altura d'água, um valor diferente de tensão era lida na placa que constituía o sistema de aquisição de dados de pressão. Assim foram obtidas as curvas de calibração características de cada transdutor de pressão.

Para a leitura dos piezômetros (um total de 6 tubos de vidro) foi executado um painel em madeira sob um papel com uma escala milimétrica, sobre o qual ficavam os tubos de vidro. Os tubos foram conectados aos orifícios do fundo do canal por mangueiras de PVC cristal, como mostra a Figura 4.12.

Os pontos de aquisição dos valores de pressão foram distribuídos dentro do 15º tanque da escada e também na saída do tanque 14º e na entrada do 16º, para que pudessemos avaliar melhor o comportamento no entorno das aberturas. A Figura 4.13 ilustra a posição onde foram obtidas as pressões.

A malha formada pelos pontos de aquisição teve de ser dividida em seis regiões, de forma a serem atendidas pelos seis transdutores que dispúnhamos para os ensaios.

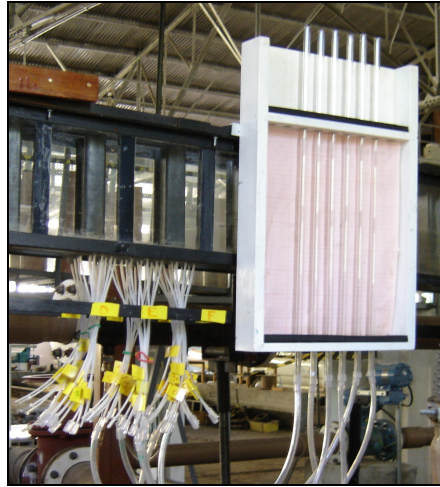


Figura 4.12. Foto do mural para leitura dos piezômetros.

Os valores de pressão média foram obtidos a partir de uma série de 18000 pontos, gerados em seis minutos de aquisição de dados em uma frequência de 50 Hz. Esse valor de frequência foi escolhido com base na bibliografia (Akabari et al. (1982), Toso e Bowers (1987)), que sugere esse valor para estruturas de dissipação de energia em que ocorram ressalto hidráulico, caso em que a turbulência é muito maior do que em uma escada para peixes.

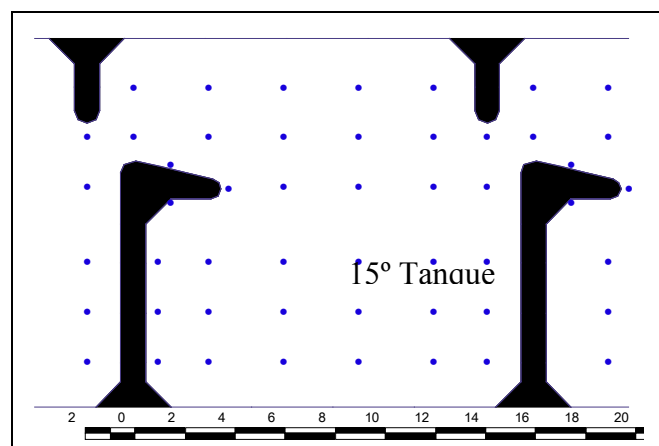


Figura 4.13. Posicionamento dos pontos de aquisição de pressão dentro do tanque.

Os pontos representam as tomadas de medição.

4.3.2.4 Aquisição dos dados de nível e lâmina d'água

Os valores de nível d'água foram obtidos com o uso de uma ponta linimétrica, porém, próximo à ranhura, onde não foi possível o uso desse equipamento, foi usada uma régua, cujas variações de valores para um mesmo ponto são apresentadas na Figura 4.14. O ponto de aquisição dos dez valores para a verificação da variabilidade foi próximo ao centro do tanque.

A precisão da ponta linimétrica usada no experimento é da ordem de um décimo de milímetro, porém, sendo o escoamento caracterizado por uma grande turbulência e conseqüente variação brusca de nível, a precisão de leitura ficou bastante limitada em relação à precisão do aparelho, como pode ser visto na Figura 4.15.

A variabilidade na leitura dos valores com o uso da ponta linimétrica fica em torno de 2mm, e com o uso de régua, 4 mm.

Os pontos de aquisição de altura d'água formam duas linhas perpendiculares entre si, e estão mostradas na Figura 4.16.

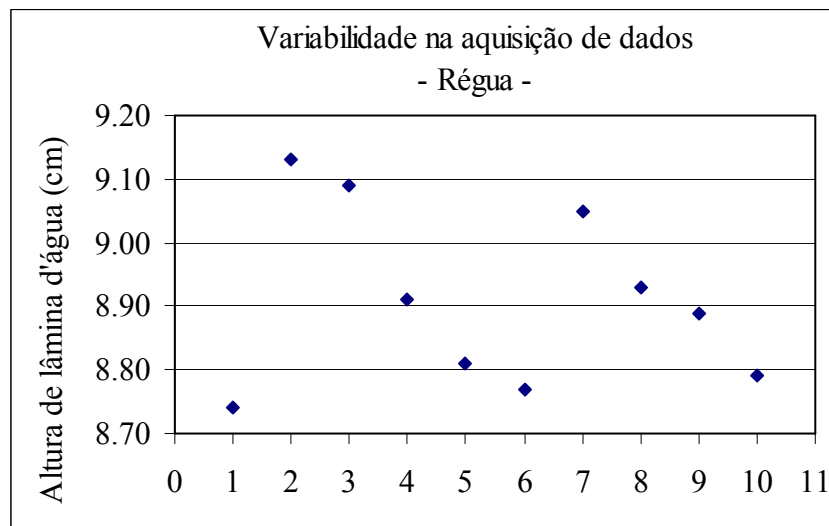


Figura 4.14. Variabilidade na leitura de valores de altura d'água com régua.

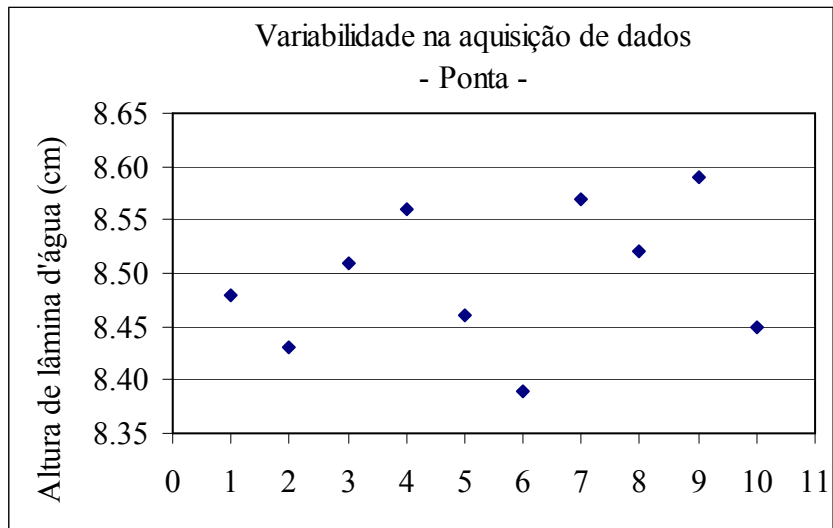


Figura 4.15. Variabilidade na leitura de valores de altura d'água com ponta linimétrica.

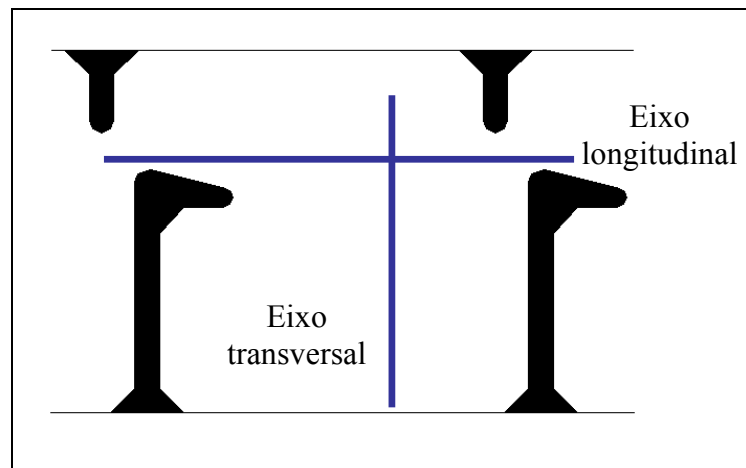


Figura 4.16. Linhas de aquisição dos dados de altura d'água.



Figura 4.17. Foto da ponta linimétrica usada no experimento.

4.3.2 Ensaio tipo B – Cálculo de diferentes parâmetros hidráulicos

Neste tipo de ensaio foram usadas 41 diferentes vazões. Os pontos de aquisição das alturas de lâmina d'água para cada uma das vazões ficavam no entorno de um dos septos do tanque (14º septo). Foram lidas as alturas imediatamente a montante do 14º septo (y_u) e imediatamente a jusante do mesmo (y_d). Na Figura 4.18 estão desenhadas essas duas lâminas.

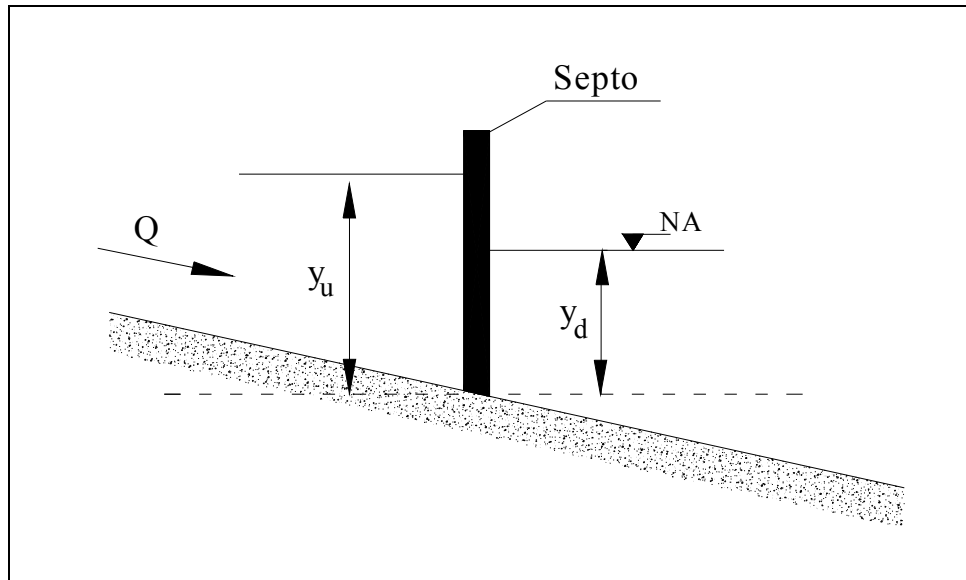


Figura 4.18. Representação das alturas y_u e y_d .

Sendo Δh tomado como constante, para calcular a profundidade média teórica (y_0) dentro de um tanque é possível fazer-se:

$$y_0 = \frac{y_u + y_d}{2} \quad (4.5)$$

uma vez que, teoricamente, a altura imediatamente a montante do 14º septo é igual à altura imediatamente a montante do 15º septo, ou seja, (y_u), como foi mostrado no Capítulo 3.

Feitas as aquisições de lâminas d'água, foram calculados parâmetros hidráulicos, como a vazão adimensional (Q^*), o coeficiente de cisalhamento (C_f) e o coeficiente de descarga (C_d). Também foi analisada a relação entre y_d e y_u .

4.3.2.1 Condição de operação para o ensaio Tipo B

As vazões ensaiadas variaram entre 0,027 e 1,80l/s. Foi considerado que, nos tanques adjacentes ao tanque de controle (14°), o escoamento permanecia uniforme, por manterem suas alturas de lâmina constantes, condição suficiente para ocorrência desse tipo de escoamento.

5 Análise dos Resultados

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos nesta pesquisa. A análise irá comparar os resultados obtidos no presente estudo com resultados obtidos na bibliografia correlata, em especial aos obtidos nos estudos publicados por Rajaratnam *et al.* (1986), que pesquisou o escoamento em um modelo similar ao modelo pesquisado no presente estudo e aos obtidos por Viana (2005), que realizou aquisições de dados de velocidades no mecanismo de transposição de peixes da UHE de Igarapava e em um modelo reduzido referente a essa estrutura, de mesma escala que o modelo usado neste trabalho.

Além disso, serão analisados os valores de pressão relacionados aos valores de velocidade obtidos neste estudo.

5.1 Verificação do Escoamento Uniforme

Na estrutura que serviu de base para este estudo foi possível encontrar dois tipos de escoamento: “uniforme”, nos tanques centrais da estrutura, onde o escoamento se desenvolve de maneira semelhante (mesma altura média no interior do tanque) e “não uniforme”, nos primeiros tanques de montante e nos tanques da extremidade de jusante. Nos primeiros tanques (4 primeiros, aproximadamente) o escoamento não é “uniforme” por não ser bem desenvolvido, e, nos tanques de jusante (5 últimos, aproximadamente), por estar sob efeito de remanso. Essa afirmativa foi verificada por meio da aquisição de valores de altura de lâmina d’água ao longo da escada.

Os ensaios de velocidade, pressão, nível e a visualização do escoamento foram realizados no 14° e 15° tanques, ou seja, no centro da escada, região onde o escoamento já se apresentava bem desenvolvido e não sofria efeitos de remanso.

5.2 Ensaios tipo A

5.2.1. Linhas de corrente

Como as filmadoras usadas no ensaio possuíam uma baixa frequência de captação de imagens (30 Hz), não foi possível visualizar o traçador na grande maioria das filmagens efetuadas no tanque. Das 115 tomadas feitas, apenas 5 trajetórias foram consideradas

satisfatórias, ou seja, capazes de mostrar as linhas de corrente, que puderam ser, em parte, reproduzidas.

Apesar disso, as trajetórias apresentadas pelo traçador puderam demonstrar a existência de linhas de corrente ascendentes e descendentes no interior do tanque. A Figura 5.1(a) apresenta um traçador próximo ao centro do vórtice e a Figura 5.1(b), um traçador na direção do jato. O traçador apresentado na Figura 5.1(a) realizou o percurso desenhado a uma velocidade média em torno de 0,3 m/s.

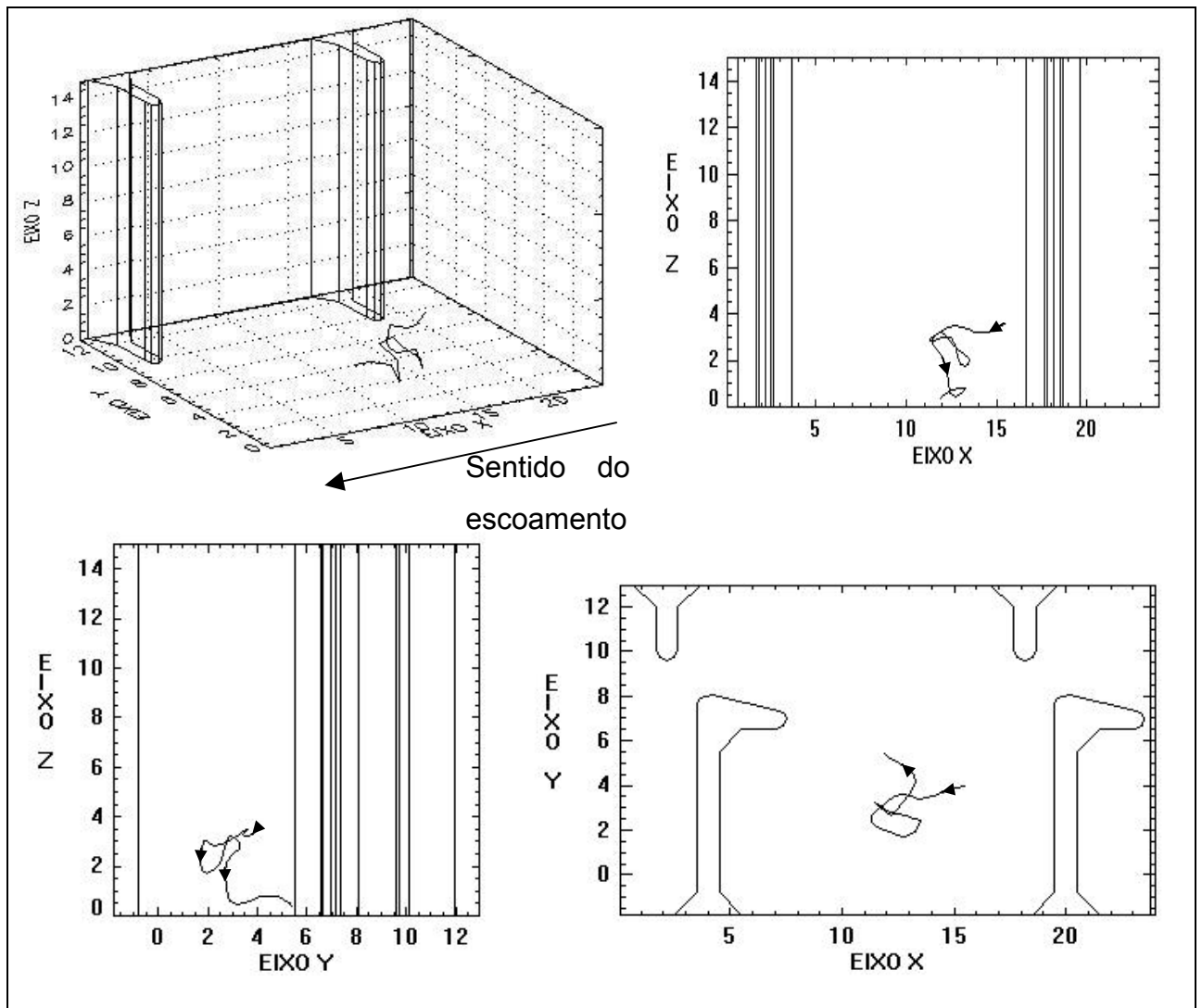


Figura 5.1(a). Gráfico em 3 dimensões das linhas de corrente do traçador no tanque de controle e a trajetória vista em planta e em perfil.

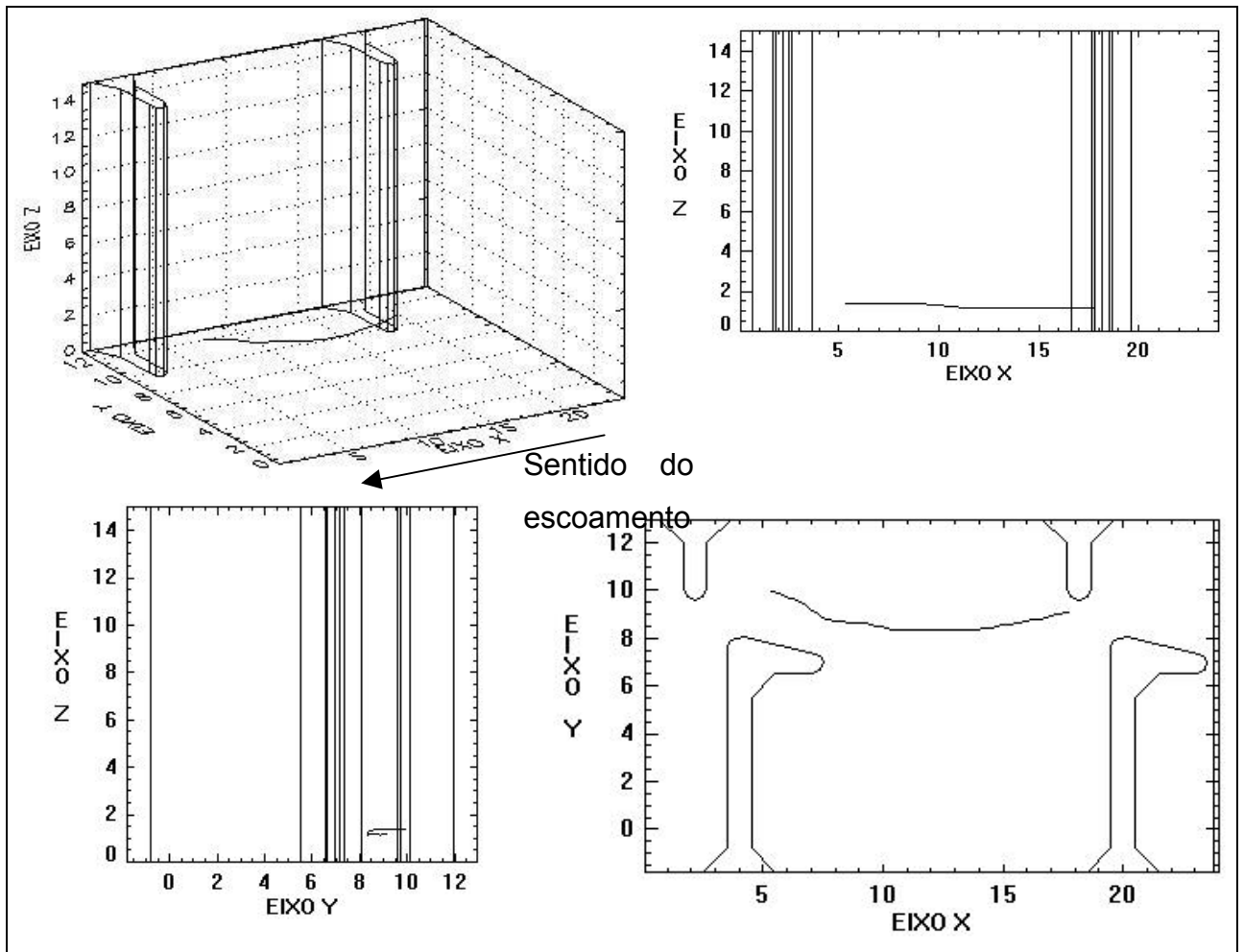


Figura 5.1(b). Gráfico em 3 dimensões das linhas de corrente do traçador na direção do jato e a trajetória vista em planta e em perfil.

Nem todos os traçadores entravam na área de recirculação à esquerda do tanque, como no caso da Figura 5.1(a), a grande maioria das 115 tomadas realizadas mostra-se similar à Figura 5.1(b), onde o traçador passa praticamente seguindo o jato, sem se desviar para a esquerda.

5.2.2 Velocidade Média

De uma forma geral, como padrão do movimento na estrutura, a água entra no tanque em forma de um jato, que se divide para a esquerda (maior volume de água) e para a direita, mais próximo à abertura. Nos dois lados ocorre recirculação da água, porém, é à esquerda que a recirculação fica mais bem caracterizada, com um vórtice bem definido e maior, como na representação da Figura 5.2, sobre uma fotografia tirada no modelo estudado. As Figuras 5.3 a 5.5 apresentam os campos de velocidade nos três diferentes planos horizontais. Na legenda estão tanto os valores referentes ao modelo quanto aos valores que corresponderiam ao protótipo.

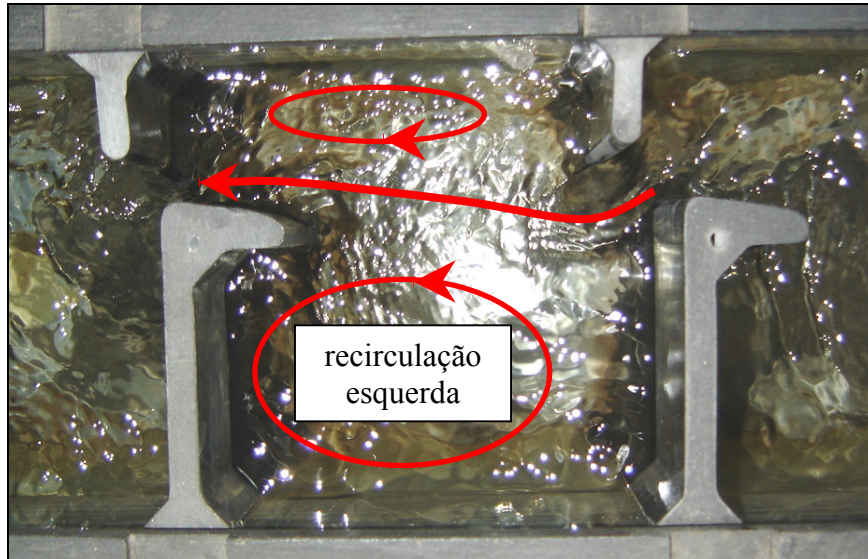


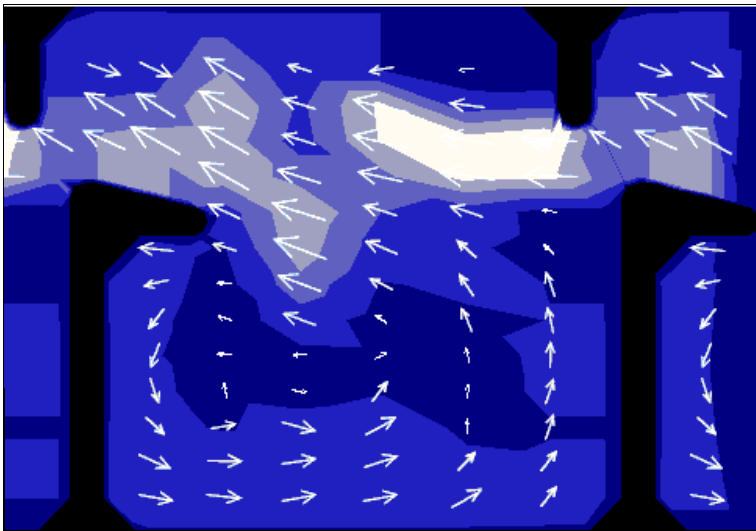
Figura 5.2. Representação do movimento d'água dentro de um tanque sobre uma fotografia do modelo estudado.

Os mapas gerados permitem confirmar a existência do jato e das recirculações de água, à direita e à esquerda, concordando com a bibliografia citada no capítulo 3.

As mais altas velocidades foram encontradas diretamente à jusante da ranhura e quase seguindo uma linha reta, concentradas em uma área restrita da seção.

O vórtice maior ficou posicionado na região mais a jusante do tanque, principalmente nos planos mais inferiores. À medida que a profundidade aumenta, o vórtice migra para jusante e ocupa um menor espaço. O contrário acontece com as altas velocidades. As maiores velocidades parecem migrar para jusante à medida que o plano se aproxima da superfície.

No primeiro plano (2 cm), as maiores velocidades estão bem próximas à ranhura, e, a medida que os planos se aproximam da superfície, as altas velocidades se expandem também para jusante. O primeiro plano apresentou a maior a maior variação de velocidades no jato. A 6 cm as velocidades se mantiveram mais uniformes dentro do jato, que ocupou uma área maior, aumentando em largura e em comprimento. Também é nesse plano que o vórtice fica em uma forma circular mais bem definida.








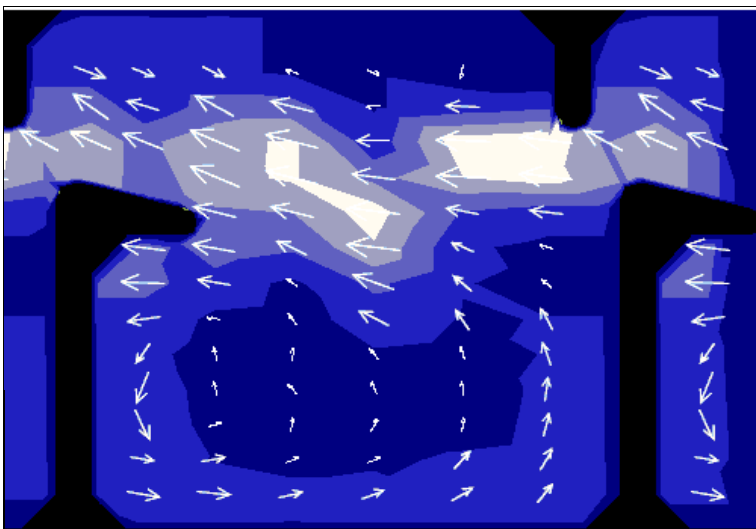
Velocidade (m/s)		
	Modelo	Protótipo
	0,4 – 0,5	1,79 – 2,23
	0,3 – 0,4	1,34 – 1,79
	0,2 – 0,3	0,89 – 1,34
	0,1 – 0,2	0,45 – 0,89
	0,0 – 0,1	0,00 – 0,45

Figura 5.3. Campo de velocidades médias a 2 cm (0,40 m no protótipo) do fundo do canal.








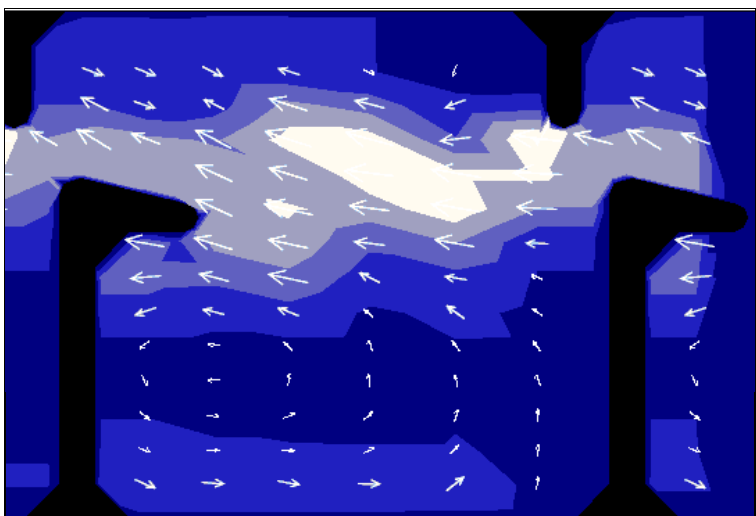
Velocidade (m/s)		
	Modelo	Protótipo
	0,4 – 0,5	1,79 – 2,23
	0,3 – 0,4	1,34 – 1,79
	0,2 – 0,3	0,89 – 1,34
	0,1 – 0,2	0,45 – 0,89
	0,0 – 0,1	0,00 – 0,45

Figura 5.4. Campo de velocidades médias a 4 cm (0,80 m no protótipo) do fundo do canal.








Velocidade (m/s)		
	Modelo	Protótipo
	0,4 – 0,5	1,79 – 2,23
	0,3 – 0,4	1,34 – 1,79
	0,2 – 0,3	0,89 – 1,34
	0,1 – 0,2	0,45 – 0,89
	0,0 – 0,1	0,00 – 0,45

Figura 5.5. Campo de velocidades médias a 6 cm (1,2 m no protótipo) do fundo do canal.

Como forma de ressaltar as variações de velocidade nos jatos foram desenhadas as velocidades ao longo do eixo longitudinal principal (na direção do jato) (Figura 5.6), para cada um dos planos (Figura 5.7). É possível verificar uma diminuição da velocidade, de montante para jusante, em todos os planos. Outro ponto a ressaltar é o fato que, no conjunto de aquisições realizadas neste estudo, nem sempre, as maiores velocidades encontraram-se nas menores profundidades. Nessa figura se evidencia a distribuição mais uniforme de velocidades no plano 3 (a 6 cm do fundo do canal) e as maiores diferenças de velocidades no plano 1 (a 2 cm do fundo), como já era possível notar nas Figuras 5.3 e 5.5.

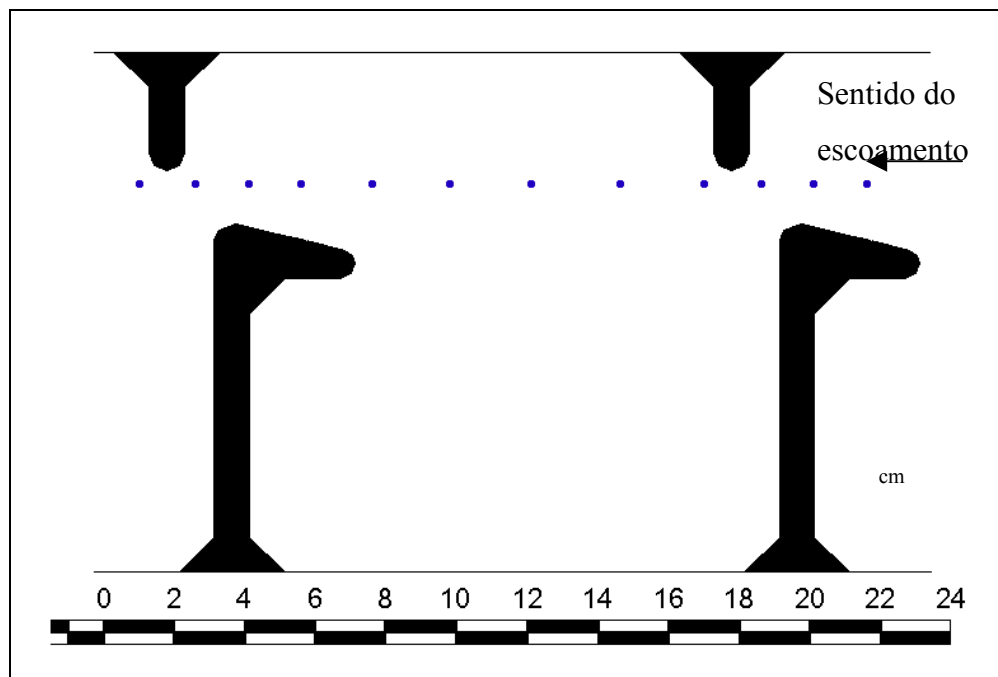


Figura 5.6. Posição dos pontos no eixo principal do jato.

Viana (2005) afirma que o escoamento tem um comportamento aparentemente helicoidal. Esse fato poderia explicar a alta variação de valores de velocidades nos planos.

Ao compararmos os resultados obtidos neste estudo com os dados de protótipo e com os dados de modelo reduzido obtidos por Viana (2005), é possível constatar uma considerável diferença em relação aos valores de velocidade média. Nas Figuras 5.8, 5.10 e 5.12 estão apresentados novamente os mapas de velocidade média obtidos no presente estudo por meio de aquisições realizadas em modelo reduzido. Nas Figuras 5.9, 5.11 e 5.13 estão apresentados os mapas de velocidade média gerados por Viana (2005) por meio de aquisições realizadas no protótipo.

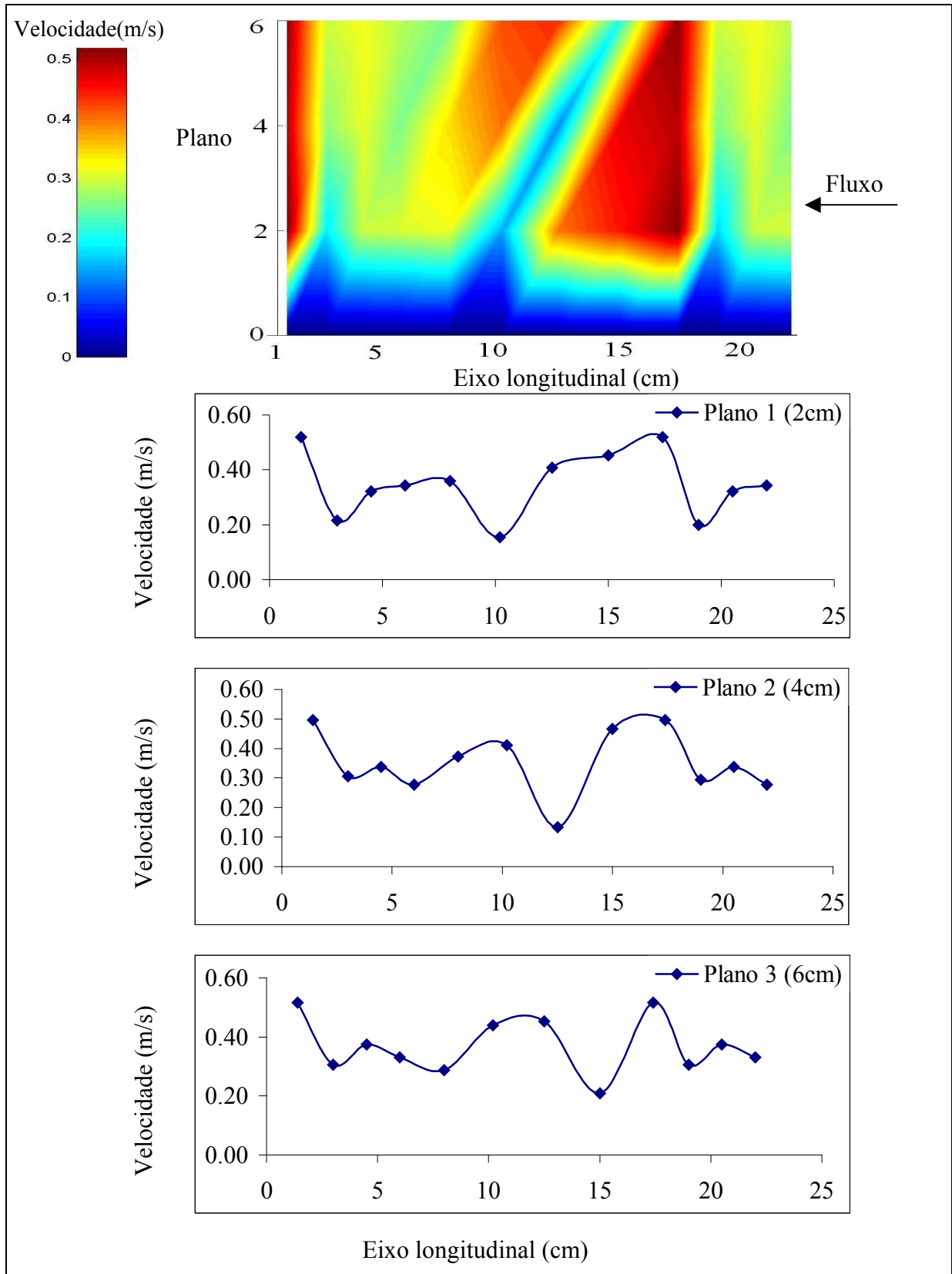


Figura 5.7. Perfil de velocidades médias ao longo do eixo longitudinal principal do tanque e o detalhamento da variação de velocidade para cada um dos planos (2, 4 e 6 cm do fundo do canal).

Embora os valores de velocidade média para modelo e para protótipo tenham apresentado diferenças significativas, o formato geral do escoamento se mostrou similar. No protótipo também é possível perceber uma distribuição de velocidades mais uniforme nos planos mais altos, ao passo que, no plano correspondente a 2 cm, as velocidades aparecem mais irregulares, com “quebras” no jato.

Também para o protótipo foi no último plano (1,20 m do fundo do canal) que o vórtice se mostrou mais bem definido e o jato teve um aumento significativo de área em relação a planos inferiores, como para os mapas gerados para o modelo, no presente estudo.

As maiores velocidades médias encontradas nas aquisições de dados realizadas por Viana (2005), tanto feitas em seu modelo reduzido (8 planos) quanto às realizadas no protótipo (9 planos), estão descritas nas Tabelas 5.1 e 5.2. Nessas tabelas também estão descritas as maiores velocidades médias obtidas no presente estudo. A Tabela 5.1 se refere às velocidades encontradas na ranhura e a Tabela 5.2 se refere às velocidades encontradas no tanque, para cada um dos planos, independentemente de sua posição horizontal. Nessas tabelas os valores de velocidade estão representados ao longo da distância vertical a partir do fundo do canal e o tamanho de cada quadro representa a área de abrangência de aquisição de cada um dos aparelhos.

Nos gráficos desenhados a partir dos valores das Tabelas 5.1 e 5.2, mostrados nas Figuras 5.14 e 5.15, percebe-se que as diferenças entre as três aquisições não apresentaram um padrão. Vários podem ter sido os motivos para essas diferenças. Possivelmente, o principal motivo para as divergências entre os valores esteja ligado às diferenças entre equipamentos e métodos de aquisição. Além disso, algum possível efeito de escala também pode ter propiciado essas divergências.

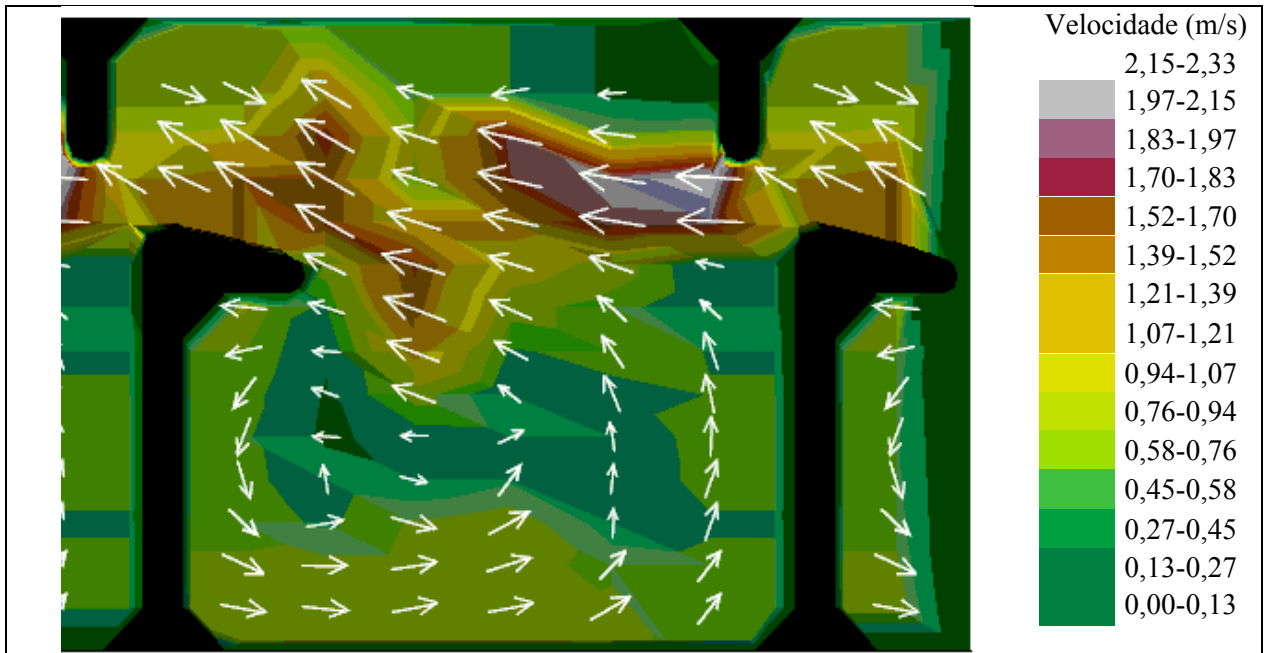


Figura 5.8. Campo de velocidades médias, correspondente a 0,40 m do fundo canal do protótipo, obtido no modelo (a 2 cm do fundo do canal), com valores de velocidade referentes ao protótipo.

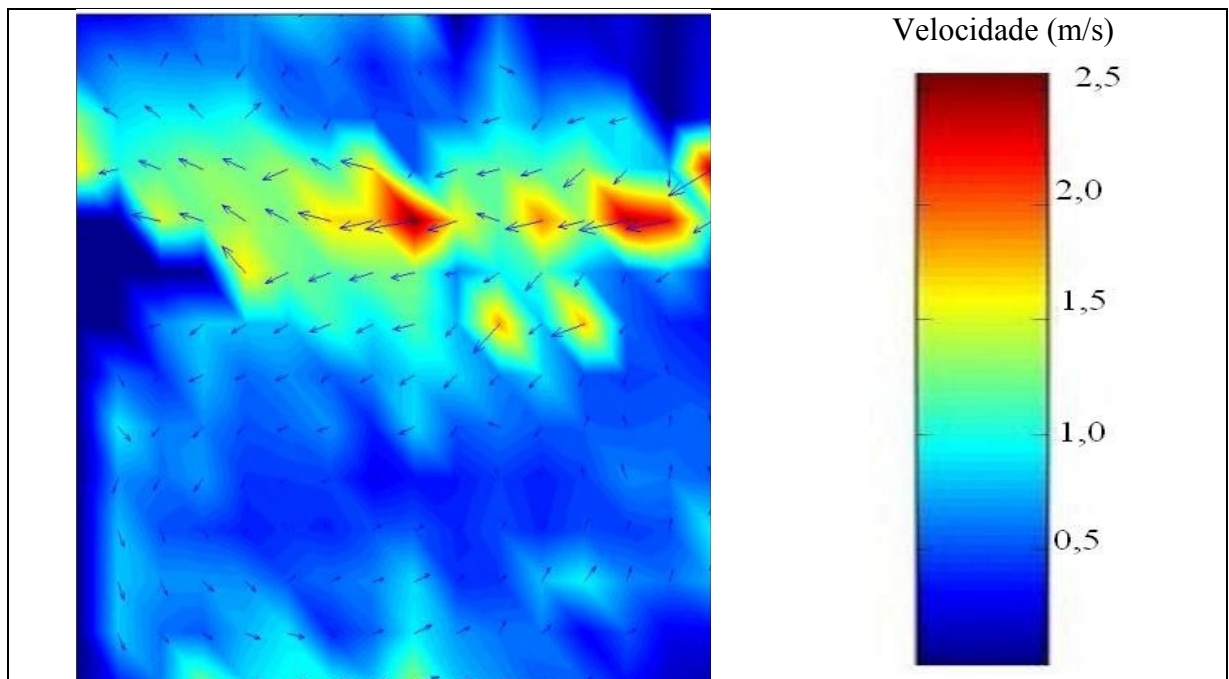


Figura 5.9. Campo de velocidades médias a 0,40 m (2 cm em modelo) do fundo do canal do protótipo.

Fonte: Viana (2005).

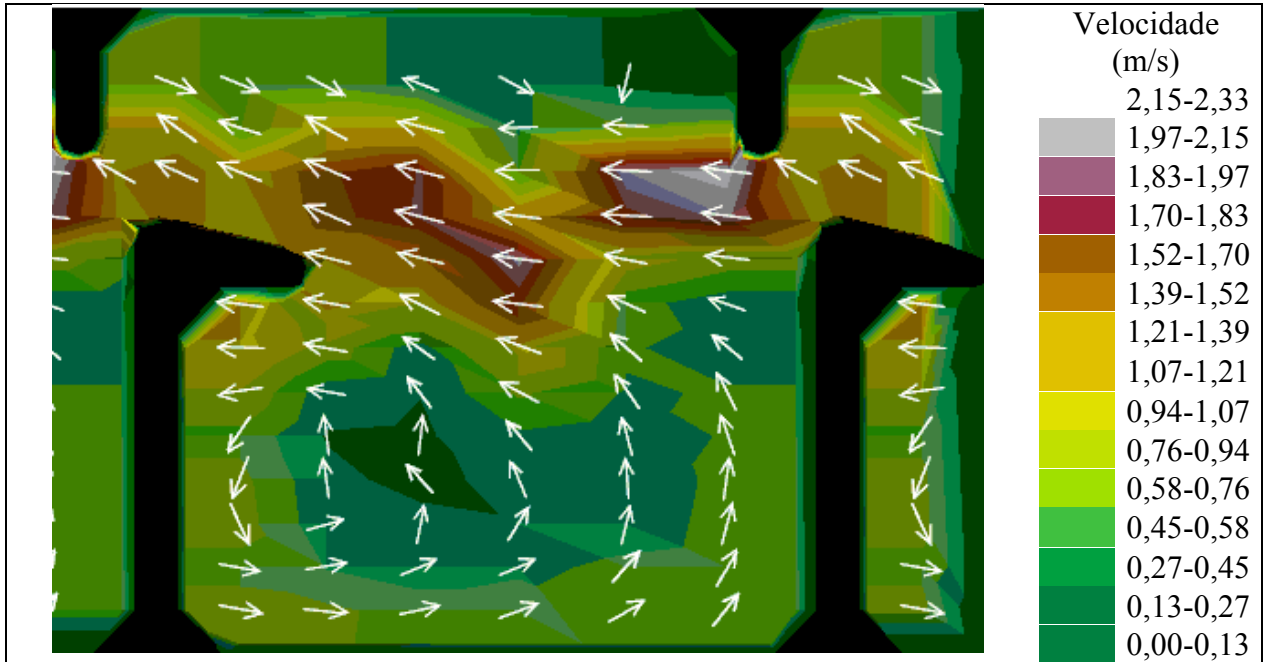


Figura 5.10. Campo de velocidades médias, correspondente a 0,80 m do fundo canal do protótipo, obtido no modelo (a 4 cm do fundo do canal), com valores de velocidade referentes ao protótipo

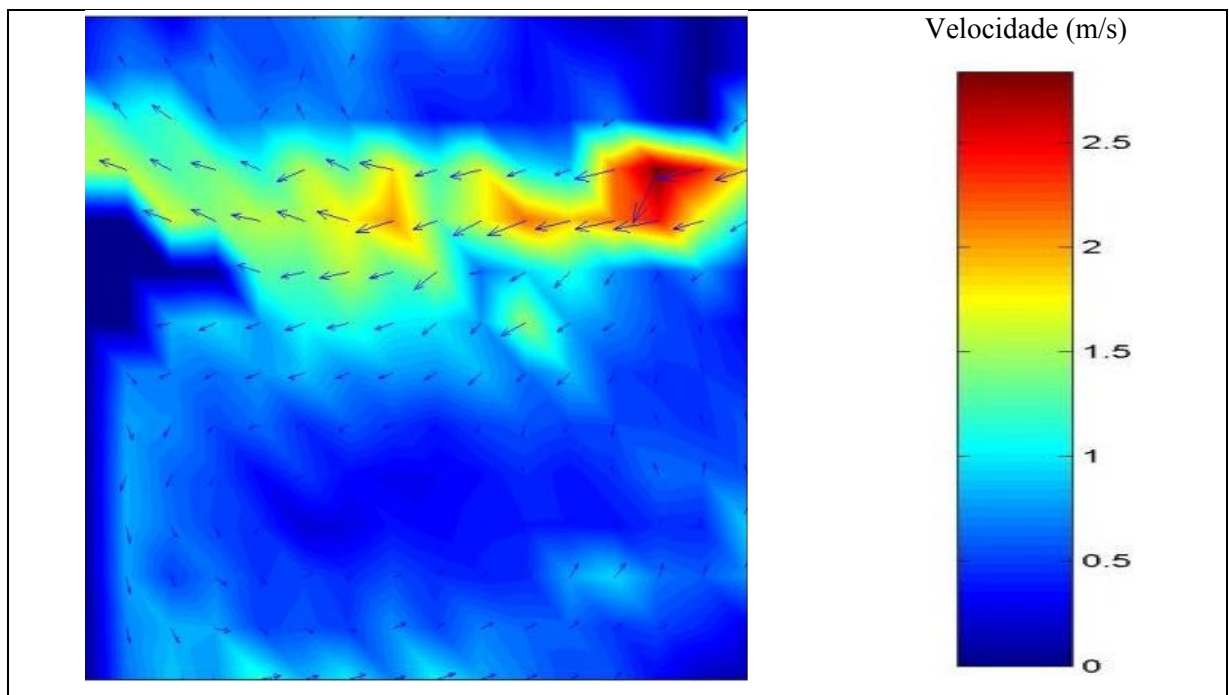


Figura 5.11. Campo de velocidades médias a 0,80 m (4 cm em modelo) do fundo do canal do protótipo.

Fonte: Viana (2005).

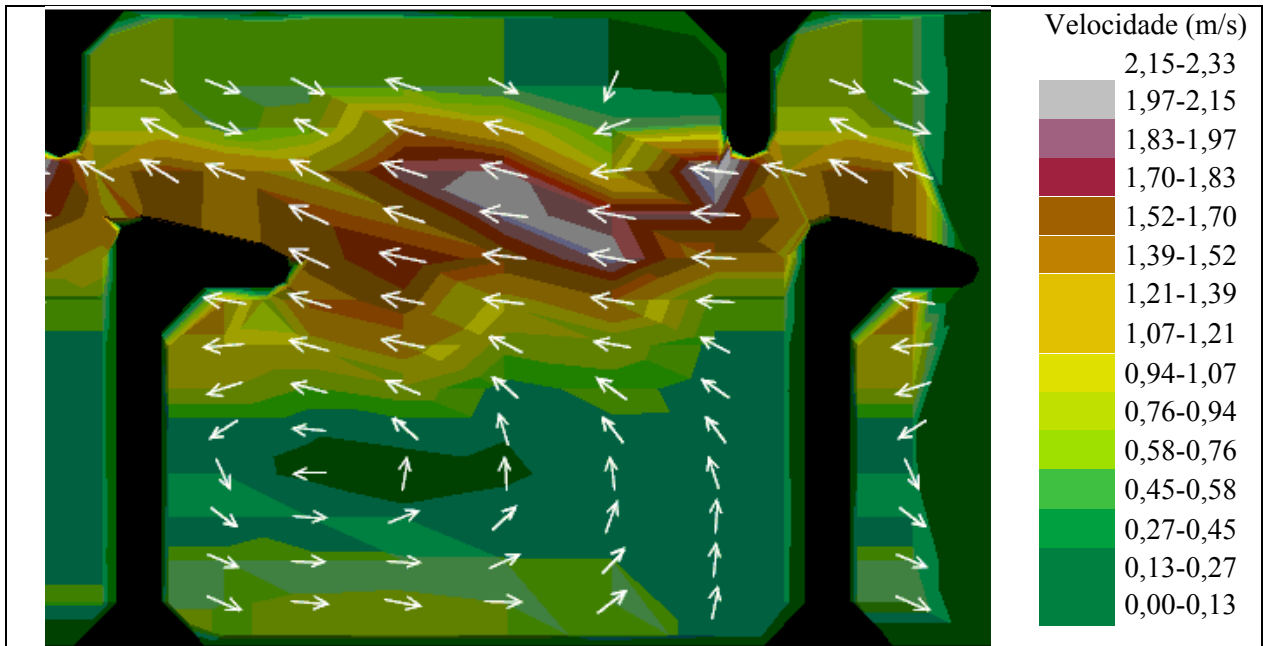


Figura 5.12. Campo de velocidades médias, correspondente a 1,20 m do fundo canal do protótipo, obtido no modelo (a 6 cm do fundo do canal), com valores de velocidade referentes ao protótipo.

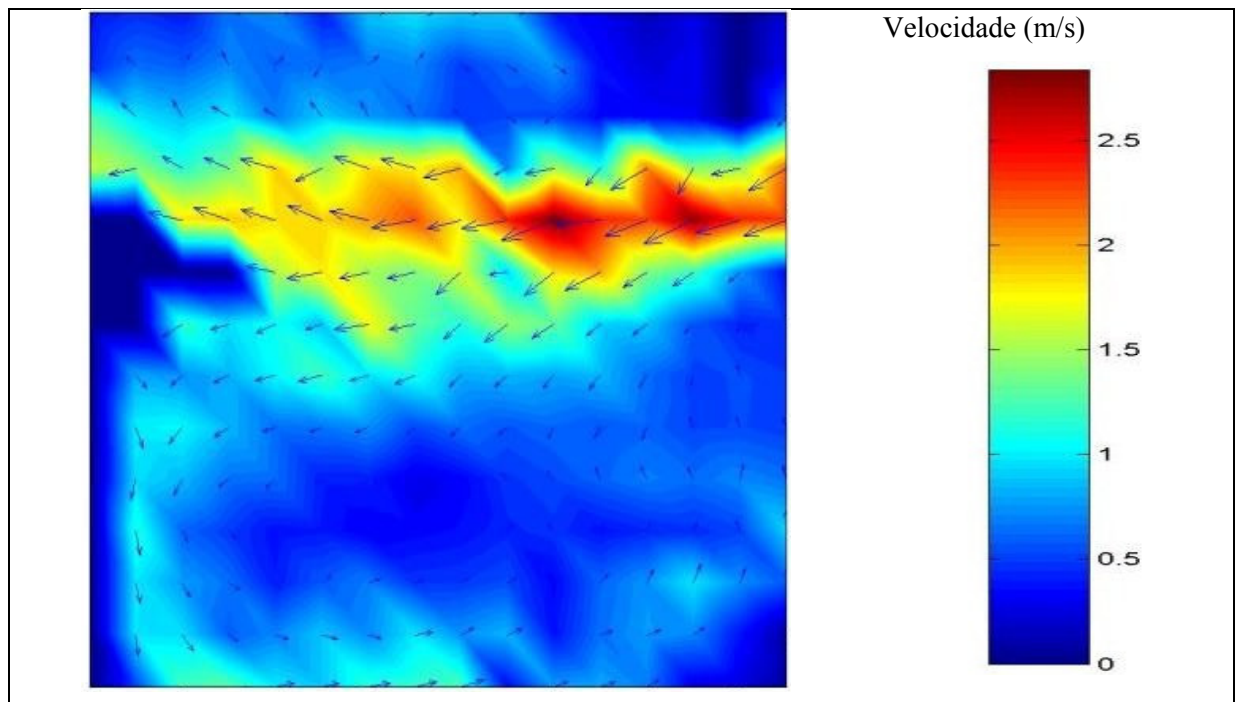


Figura 5.13. Campo de velocidades médias a 1,20 m (6 cm em modelo) do fundo do canal do protótipo.

Fonte: Viana (2005).

Tabela 5.1. Velocidades médias máximas encontradas na ranhura.

Distância* (cm)	Velocidade média máxima na ranhura (m/s)			
	Presente estudo	Viana (2005)		
	Modelo (1:20)	Modelo (1:20)	Protótipo	
	Micromolinete	ALD	Molinete	
Distância em relação ao fundo do canal (cm)	180		1,65	
	170			
	160		1,73	
	150			
	140		0,98	
	140		1,90	
	130			
	120	1,32	0,84	1,65
	110			
	100		1,25	1,81
	90			
	80	1,19	1,65	1,50
	70			
	60		1,52	1,09
	50			
	40	0,83	1,34	1,35
30				
20		1,43	1,12	

*As dimensões da tabela estão em escala de protótipo.

Tabela 5.2. Velocidades médias máximas encontradas no tanque.

Distância (cm)	Velocidade média máxima no tanque (m/s)			
	Presente estudo	Viana (2005)		
	Modelo (1:20)	Modelo (1:20)	Protótipo	
	Micromolinete	ALD	Molinete	
Distância em relação ao fundo do canal (cm)	180		2,16	
	170			
	160		2,18	
	150			
	140		1,80	2,07
	130			
	120	2,29	1,83	2,00
	110			
	100		2,00	2,01
	90			
	80	2,20	2,00	2,30
	70			
	60		2,05	1,70
	50			
40	2,32	2,15	1,60	
30				
20		1,70	1,25	

*As dimensões da tabela estão em escala de protótipo.

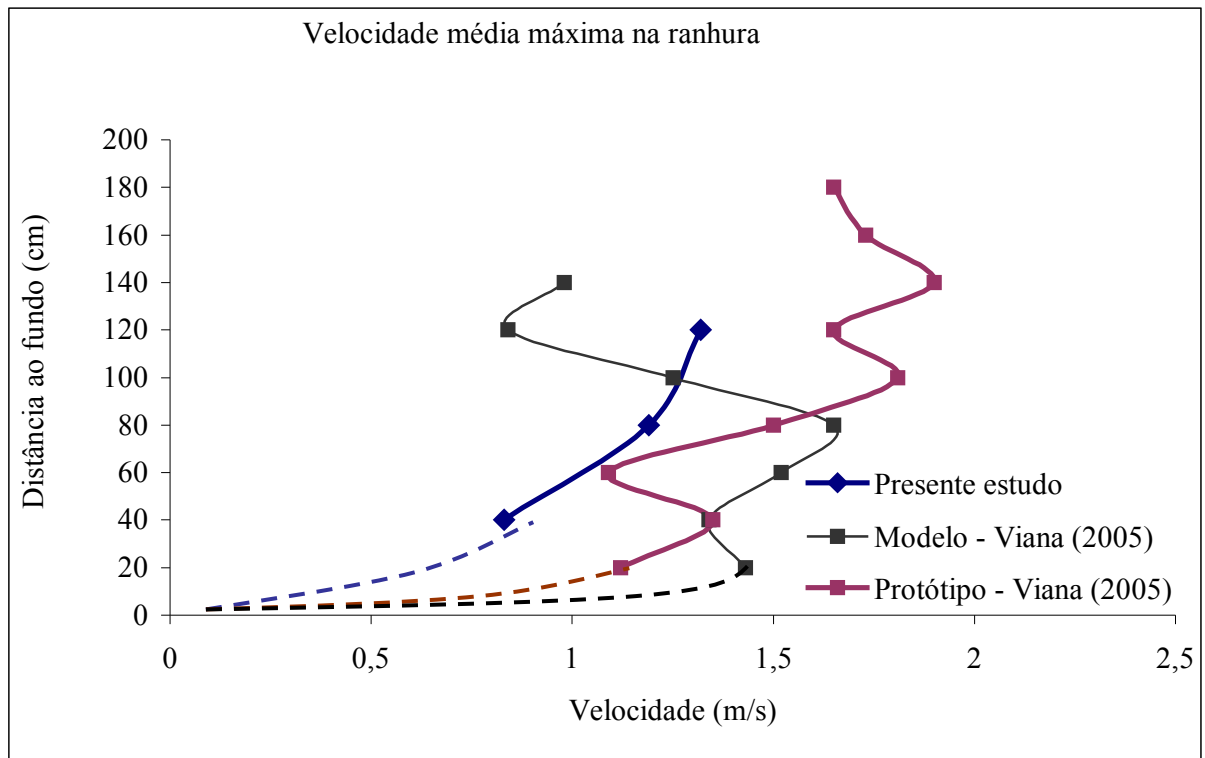


Figura 5.14. Velocidades médias máximas encontradas na ranhura.

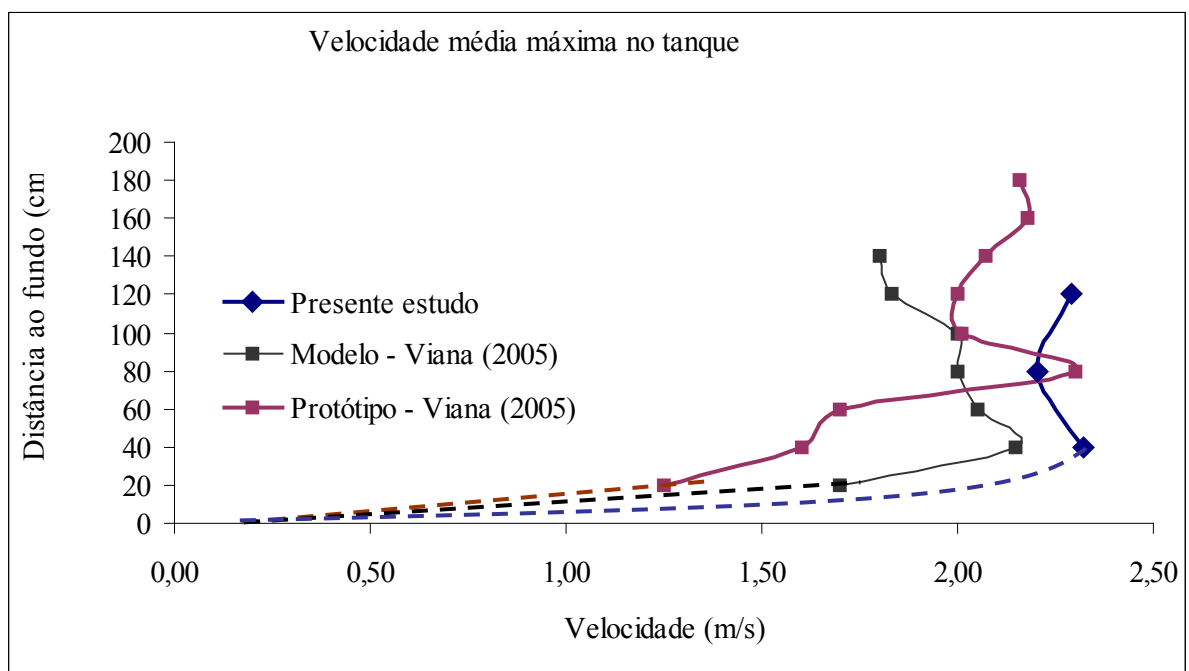


Figura 5.15. Velocidades médias máximas encontradas no tanque.

É importante frisar que na Figura 5.15 os pontos de maior velocidade média não estão necessariamente nos mesmos locais, esses pontos representam a maior velocidade média encontrada para cada plano, independentemente de sua posição horizontal.

Deve-se ainda salientar que Viana (2005) realizou aquisições no protótipo com o uso de um molinete, e no modelo com o uso de um Anemômetro Laser Doppler (ALD).

O molinete (marca GLOBAL WATER, modelo FP101-FP201) possui uma hélice de 5 cm de diâmetro (volume aproximado de aquisição de 19 cm^3), protegida por um cilindro plástico. A conversão da contagem de giros da hélice é feita por um aparelho eletrônico preso à haste do aparelho, que mostra a leitura de velocidade média e velocidade máxima. Segundo o fabricante, a incerteza de leitura desse instrumento é de 0,03 m/s. Já o ALD é um sistema de medição que não interfere no escoamento e utiliza um volume de aquisição de velocidade inferior a $1,15 \text{ cm}^3$, em escala referente ao protótipo. A velocidade é calculada a partir da velocidade das partículas encontradas na água. Espera-se, portanto, uma maior precisão de medida de velocidade com esse instrumento, em comparação ao anterior.

Esse fato também deve ser levado em conta ao analisar-se os dados de velocidade média obtidos no presente estudo, uma vez que o micromolinete empregado em nosso modelo abrange um volume de aquisição ainda maior que os anteriores. O micromolinete usado no presente estudo possuía um diâmetro de 1 cm, o que, no protótipo, representaria um diâmetro equivalente a 20 cm, tornando o volume de aquisição de velocidade próximo a 1800 cm^3 , se calculado em escala de protótipo. Esse provavelmente é o motivo pelo qual, neste estudo, obtiveram-se valores de velocidade com menores variações entre os planos.

Outra diferença quanto aos equipamentos de medição está no fato do micromolinete empregado neste estudo não possuir cilindro de proteção, diferentemente do molinete usado no protótipo. Além disso, o método de aquisição usado modelo do presente estudo foi diferente do usado no protótipo. Enquanto no primeiro o molinete foi usado apenas na direção da maior velocidade, Viana (2005) registrou a velocidade média em duas componentes (longitudinal e transversal ao eixo da escada) para então compor a máxima velocidade, com seu respectivo ângulo.

No modelo ensaiado foram registradas velocidades superiores a 0,5 m/s, o que corresponderia, no protótipo, a velocidades superiores a 2 m/s, portanto, acima da velocidade de projeto. Apesar disso, mesmo com os elevados valores encontrados, inclusive no protótipo, Viana (2005) constatou que peixes de diferentes tamanhos conseguem transpor o mecanismo. O autor afirma que os peixes costumam nadar em espaços próximos à parede, procurando regiões de menores velocidades. Essa talvez seja a explicação de alguns peixes, inclusive

pequenos, transporem a escada. Segundo Santos (2004), a velocidade crítica para 5 minutos (máxima velocidade que o animal pode manter durante esse tempo) da espécie *Pimelodus maculatus* é da ordem de 2 m/s, uma velocidade abaixo das encontradas no protótipo; no entanto, essa foi uma das espécies catalogadas por Santos (2004) como capazes de transpor a escada de Igarapava.

5.2.3 Pressões no fundo do tanque

Os valores de pressão apresentados dizem respeito aos dados obtidos por meio do uso de transdutores elétricos de pressão. A Figura 5.16 apresenta a distribuição de pressão média no interior do tanque para a condição estudada.

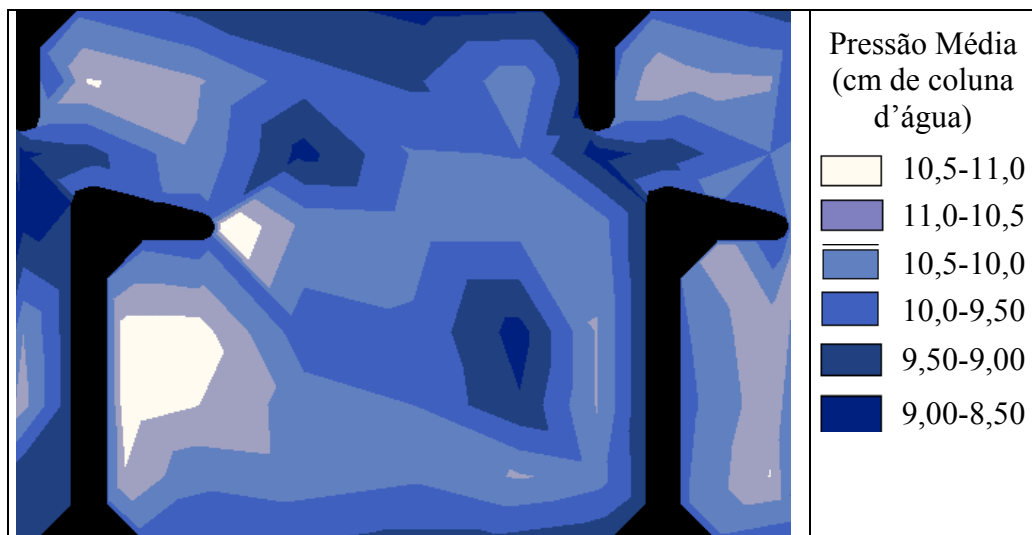


Figura 5.16. Distribuição de Pressões Médias.

Pelo mapa gerado foi possível perceber que as menores pressões médias ficaram na ranhura do tanque, coincidindo com a formação do jato e na zona de recirculação de água. Os maiores valores de pressão média ficaram a montante do septo esquerdo (maior) e a montante do septo direito (menor). Nesses locais o escoamento colide com as paredes dos septos, elevando o nível d'água, formando uma espécie de represamento.

Como forma de avaliar a amplitude dos valores de pressão foi calculado o desvio padrão da série de dados para cada ponto. A Figura 5.17 apresenta o resultado desse cálculo, distribuído ao longo do tanque.



Figura 5.17. Desvio padrão de pressões.

As maiores flutuações de pressão ocorrem na abertura, junto ao jato e em toda a linha de ação desse, até saída do tanque. As menores flutuações estão no centro da zona de recirculação maior. O maior desvio de pressão encontrado (jato) foi da ordem de 2,47 cm. Nesse ponto, o máximo valor da série de 18000 pontos foi de 12,8cm e o mínimo foi de 4,96 cm de coluna d'água. A média relativa a essa série foi de 8,38 cm.

Uma medida de flutuação relativa ao valor médio pode ser obtida dividindo-se o desvio padrão da série pela sua média. Tem-se, dessa forma, o percentual de variação dos valores em relação a sua grandeza média. Esse cálculo foi feito para cada ponto e está representado na Figura 5.18.



Figura 5.18. Flutuação relativa de pressões.

Nessa imagem também fica aparente a área de grandes variações de pressão, que coincide com o jato e a área de baixas flutuações, que coincide com o vórtice gerado pela recirculação de água no tanque.

5.2.4 Distribuição de velocidade associada à distribuição de pressão

Como forma de analisar a relação entre a distribuição de velocidades e a distribuição de pressões dentro do tanque foram geradas figuras que apresentam as direções de velocidades a 2cm do fundo do canal sobre os valores de pressão. É importante salientar que as aquisições dos valores de velocidade e de pressão foram realizadas em dois tanques consecutivos (14° e 15°, respectivamente, como descrito no capítulo 4) devido à dificuldade de visualização do escoamento no 15° tanque, onde ficavam as mangueiras dos transdutores de pressão. A numeração dos tanques é dada de montante para jusante.

Na Figura 5.19 foi desenhado o mapa gerado a partir da distribuição de velocidades a 2cm do fundo do canal sobre o mapa de distribuição de pressão média.

A partir da figura é possível constatar as baixas pressões médias na ranhura, coincidindo com os altos valores de velocidade média. Também é possível perceber o represamento causado pelo septo maior concordando com uma sutil queda de velocidades.

Na Figura 5.20 está representado o mapa gerado a partir da distribuição de velocidades a 2cm do fundo do canal sobre o mapa de desvio padrão de pressões e, na Figura 5.21, sobre o mapa de desvio padrão sobre a média das pressões.

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram claramente a queda nas flutuações de pressão que ocorrem no vórtice esquerdo, principalmente em seu centro, e a alta variabilidade de pressões que ocorre em toda a área do jato.

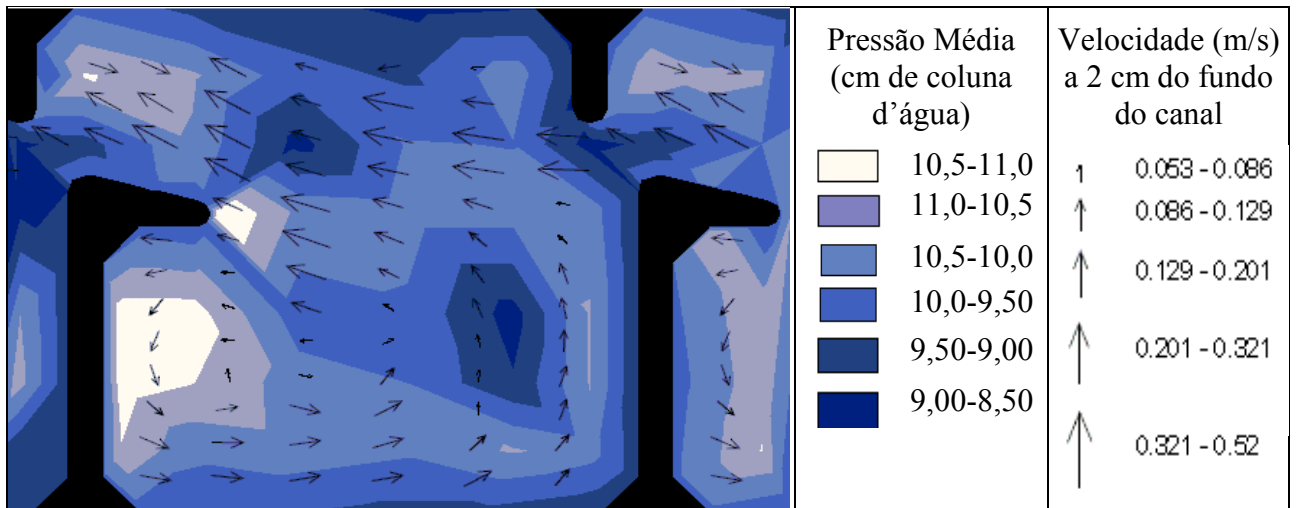


Figura 5.19. Distribuição de velocidades médias e a distribuição de pressões.

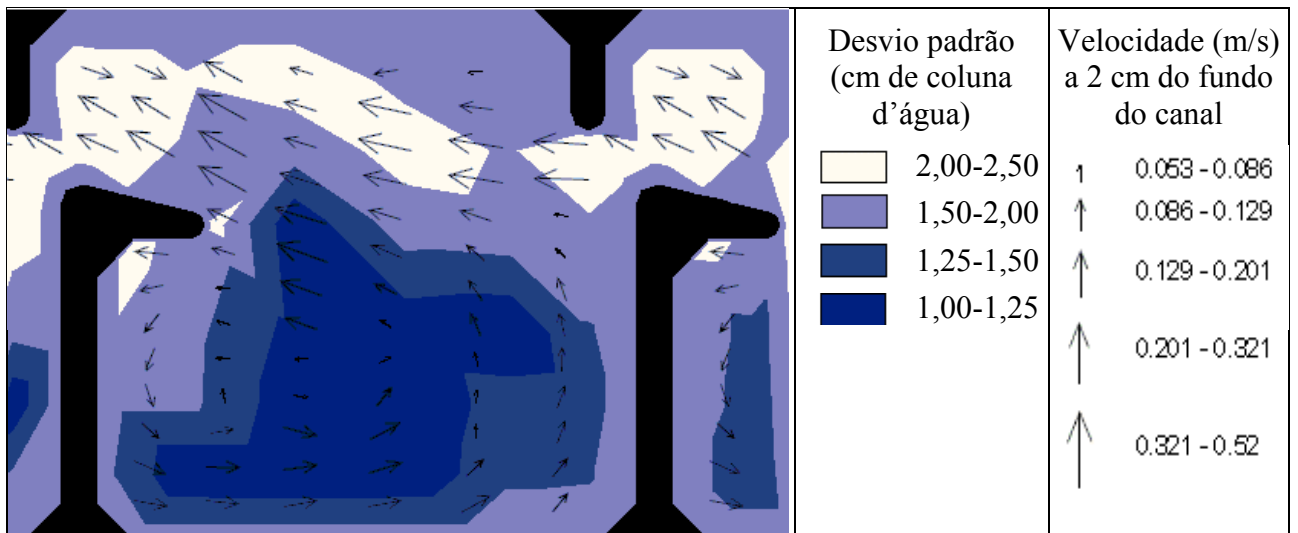


Figura 5.20. Distribuição de velocidades médias e o desvio padrão de pressões.

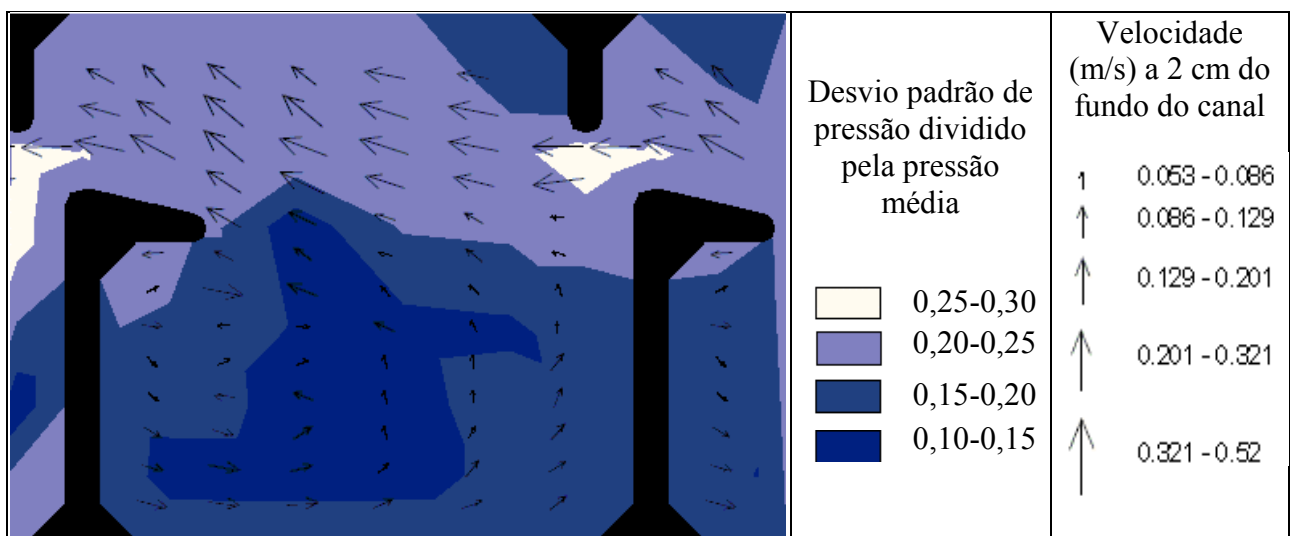


Figura 5.21. Distribuição de velocidades médias e a flutuação relativa de pressões.

5.2.5 Altura d'água

O perfil da altura d'água foi desenhado ao longo do eixo longitudinal principal (no jato) e ao longo do eixo central transversal do canal (Figura 5.22 e Figura 5.23). No desenho do eixo longitudinal é possível verificar o armazenamento de água que ocorre a jusante do tanque, na região anterior à ranhura.

As menores lâminas d'água ao longo do eixo longitudinal foram as registradas logo a jusante da entrada (Figura 5.22), próximo à região de velocidades mais altas.

No desenho do eixo transversal é possível verificar o armazenamento de água que ocorre no lado esquerdo do tanque, onde fica o septo maior.

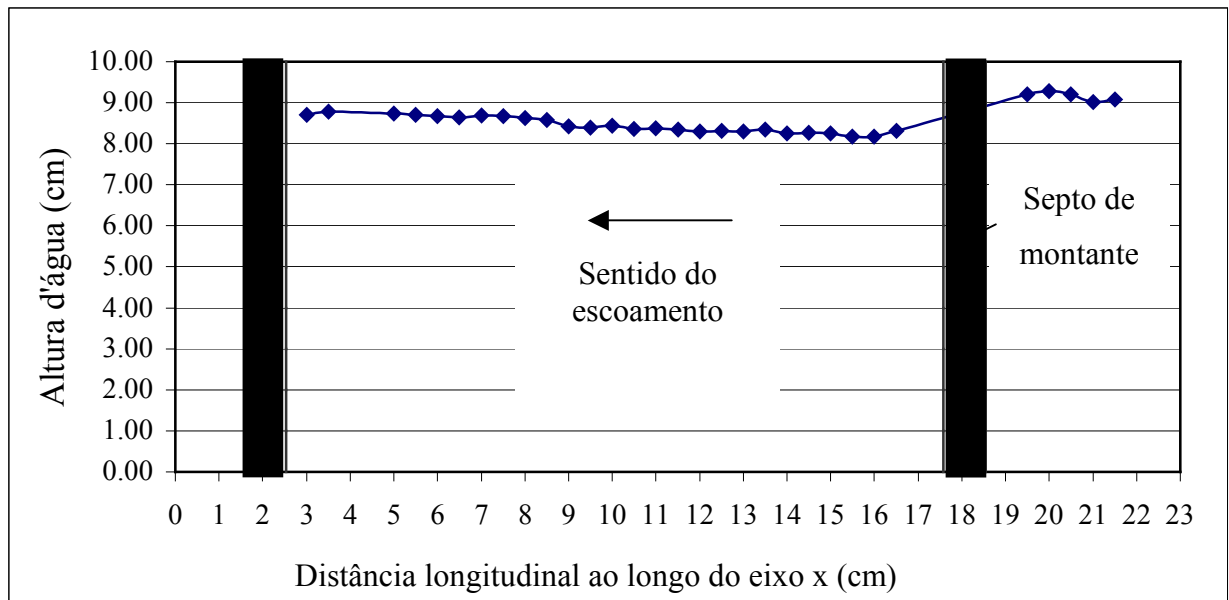


Figura 5.22. Alturas d'água ao longo de um eixo longitudinal ao tanque.

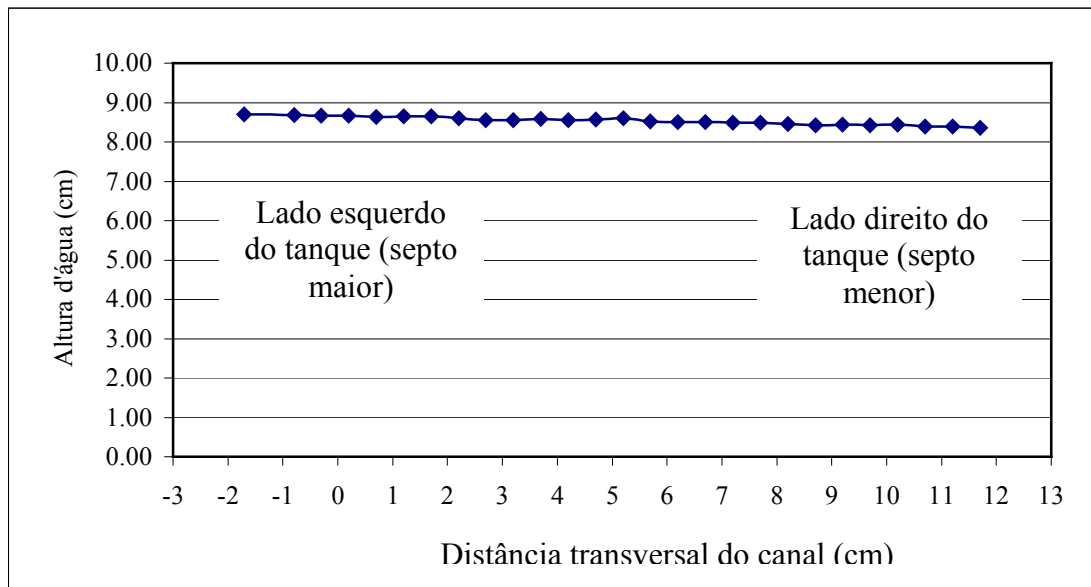


Figura 5.23. Alturas d'água ao longo de um eixo transversal ao tanque.

5.3 Ensaios tipo B

5.3.1 Verificação de escoamento subcrítico ou supercrítico

Escoamentos em regime supercrítico ou torrenciais são escoamentos em que as forças de inércia são preponderantes em relação às forças gravitacionais. A altura efetiva da linha d'água está abaixo da altura crítica. No regime subcrítico ocorre o contrário, a altura efetiva do escoamento está acima da altura crítica e as forças gravitacionais são as forças preponderantes no escoamento. Em escoamentos torrenciais, possíveis perturbações no escoamento são propagadas apenas para jusante, enquanto que, para regimes fluviais, perturbações no escoamento são propagadas tanto para jusante quanto para montante.

Em uma estrutura como a aqui ensaiada, a altura de jusante (y_d) pode ser considerada uma condicionante do escoamento, que só terá influência na altura de montante (y_u) se o escoamento estiver em regime fluvial.

Para a verificação da influência da altura de jusante sobre a altura de montante, Rajaratnam et al. (1986) relacionaram essas duas grandezas em um gráfico, dividindo-as pela altura crítica

de cada vazão ensaiada. Desse modo, para valores superiores à unidade, o escoamento apresenta regime fluvial, e para valores inferiores, regime torrencial.

Em nossos ensaios, as menores vazões possíveis foram testadas na estrutura, mesmo assim, as características dessa não permitiram a existência de alturas de montante inferiores às alturas críticas. Para a região de jusante da ranhura, no entanto, foi possível chegarmos a regime torrencial, como é mostrado na Figura 5.24. Nessa figura, foram desenhados tanto os valores obtidos neste estudo quanto os dados obtidos por Rajaratnam et al. (1986).

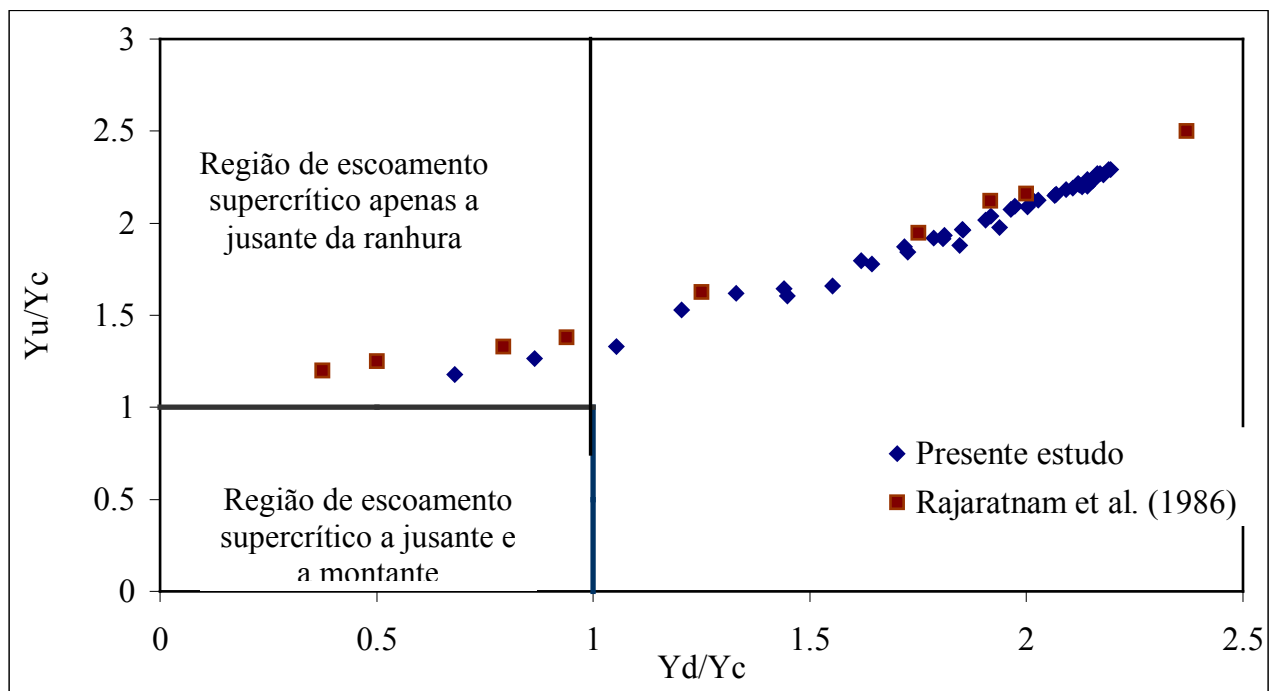


Figura 5.24. Relação entre a altura a montante e a de jusante para cada vazão ensaiada obtida neste estudo e obtida por Rajaratnam et al. (1986).

A Figura 5.24 mostra que, apenas a partir do momento em que se desenvolve um regime fluvial na região a jusante da ranhura, y_d passa a ter influência sobre a altura de montante, mesmo que essa (y_u) já apresente regime subcrítico. A partir dessa figura, fica evidente a mesma tendência entre as duas amostras, embora os dados do presente estudo se apresentem inferiores aos dados obtidos por Rajaratnam et al. (1986). Um dos motivos deve ser o fato da inclinação da estrutura aqui estudada ser de 6%, enquanto que o modelo estudado pelos autores possuía uma declividade de 10%.

Nos estudos de Rajaratnam et al, (1986), o modelo ensaiado, embora similar ao pesquisado neste trabalho, possui algumas diferenças geométricas, como pode ser observado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Resumo das características do modelo e protótipo do presente estudo e do modelo de Rajaratnam et al. (1986).

Característica Geométrica	Presente estudo		Rajaratnam <i>et al.</i> (1986)		Relação entre os dois modelos ou protótipos
	Modelo (escala 1:20)	Protótipo	Modelo (escala 1:5,33)	Protótipo	
B(m)	0,15	3	0,46	2,44	0,81
L(m)	0,15	3	0,57	3,05	1,02
b ₀ (m)	0,02	0,4	0,06	0,3	0,75
Declividade (%)	6	6	10	10	1,67
Número de tanques	26	187	5		
B/L	1	1	0,8	0,8	0,80
L/b ₀	7,5	7,5	10,17	10,17	1,36
B/b ₀	7,5	7,5	8,13	8,13	1,08
Faixa de vazões ensaiadas (l/s)	0,027 – 1,80	48 - 3220	5,00 – 21,50	328 - 1410	

5.3.2 Vazão Adimensional

Como descrito no Capítulo 3, Rajaratnam et al. (1986) definiram a vazão adimensional (Q_*) como sendo:

$$Q_* = \frac{Q}{\sqrt{gS_0 b_0^5}} = \frac{y_0}{b_0} \sqrt{\frac{2}{mC_f}} \quad (3.23)$$

Rajaratnam et al. (1986) apresentaram um gráfico onde as ordenadas continham as vazões adimensionais (Equação 3.23) calculadas para seus ensaios e as abscissas continham o parâmetro adimensional y_0/b_0 , sendo y_0 a profundidade média teórica do escoamento e b_0 a abertura dos septos. A partir do gráfico gerado, os autores definiram Q_* como uma função linear de y_0/b_0 da seguinte forma, como mostrado no capítulo 3:

$$Q^* = 3,77 \left(\frac{y_0}{b_0} \right) - 1,1. \quad (3.26)$$

Ao fazerem essa afirmação, os autores consideraram C_f como tendo um valor constante. É preciso ressaltar também que a Equação 3.26 é válida para valores de $y_0/b_0 \geq 1,10/3,77$.

Em 1999, Wu et al., estudaram modelos similares aos do presente estudo, porém com uma declividade de 5% para o canal. A partir desse estudo os autores propuseram uma outra simplificação para Q_* em função do parâmetro y_0/b_0 :

$$Q_* = 3,75 \left(\frac{y_0}{b_0} \right). \quad (5.1)$$

Embora muito próxima à Equação 3.26, a equação proposta por Wu et al. (1999) não tem o inconveniente de não passar pela origem dos eixos coordenados.

No estudo aqui apresentado, a partir de 41 ensaios no modelo, com vazões variando entre 0,027 e 1,80l/s, e uma declividade de 6% no canal, foi possível a realização de uma nova análise entre os parâmetros Q_* e y_0/b_0 . Partindo-se dessa análise, obteve-se a Equação 5.2, válida para números de Reynolds entre 850 e 4300.

$$Q_* = 2,38 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)^{1,19}. \quad (5.2)$$

A Figura 5.25 apresenta as vazões adimensionais (calculadas a partir da Equação 3.23) para os dados do presente estudo e as curvas geradas pelas Equações empíricas 3.26 e 5.1. Nessa figura também está representada a curva gerada pela Equação 5.2, sugerida neste trabalho e ajustada a partir dos valores gerados com o uso da Equação 3.23. Observa-se que os valores gerados com o uso da Equação 5.2 estão mais bem ajustados à Equação 5.1, sugerida por Wu et al. (1999), para os dados do presente estudo, provavelmente devido ao fato de os dois modelos que geraram essas equações de ajuste terem praticamente a mesma declividade. O modelo Wu et al (1999) possuía uma declividade 5% e o modelo usado no presente estudo,

6%. Como mostrado na Tabela 5.3, o modelo pesquisado por Rajaratnam et al. (1986), possuía uma declividade 10%.

É importante salientar que os valores aos quais as Equações 5.1 e 3.26 foram ajustados não são conhecidos e que a estrutura ensaiada neste trabalho apresenta uma geometria diferente aos trabalhos anteriores, conforme ressaltado na Tabela 5.3. No entanto, para geometrias de estruturas iguais às ensaiadas neste trabalho, a relação entre os parâmetros Q_* e y_0/b_0 recomendada é a representada pela Equação 5.2.

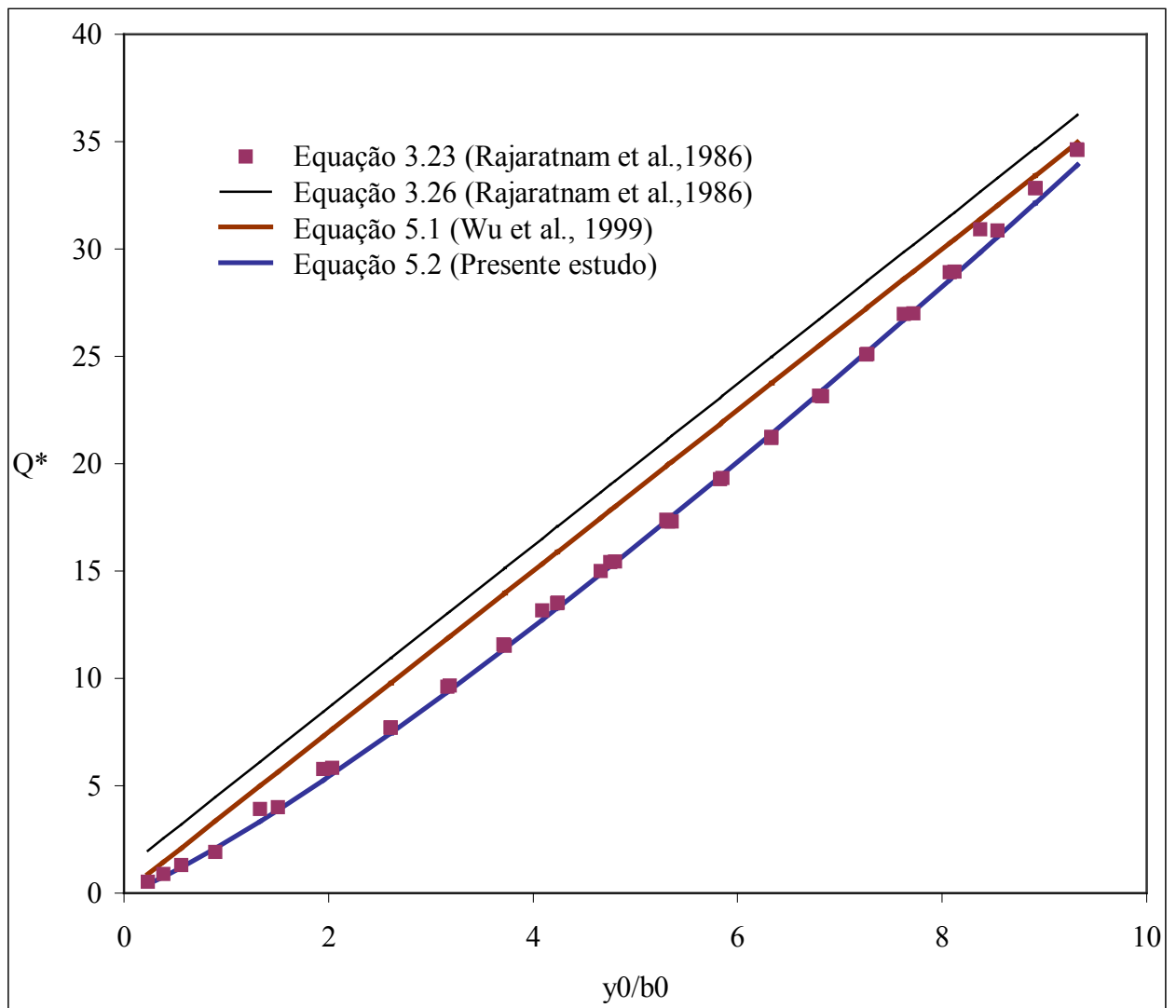


Figura 5.25. Relações entre os parâmetros Q_* e y_0/b_0 encontradas na literatura e a sugerida neste estudo.

5.3.3 Coeficiente de cisalhamento (C_f)

Segundo Rajaratnam et al. (1986), o valor do coeficiente de cisalhamento (C_f) pode ser calculado a partir da Equação 3.22, citada no capítulo 3:

$$C_f = \frac{2}{m} \frac{b_0 S_0 g}{V^2} \quad (3.22)$$

Os autores afirmam que, caso o coeficiente de cisalhamento (C_f) seja constante, a relação $Q_* = f(y_0/b_0)$ será linear.

No presente estudo, C_f foi calculado a partir da Equação 3.22 para as 41 diferentes vazões ensaiadas. Foi possível constatar sua variação, conforme mostrada na Figura 5.26. Verificada essa variação, foi possível sugerir uma equação de previsão de C_f em relação ao parâmetro y_0/b_0 , representada pela Equação 5.3, válida para número de Reynolds entre 850 e 4300 e utilizando o raio hidráulico na ranhura como dimensão característica.

$$C_f = 0.15 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)^{-0.3} \quad (5.3)$$

Na Figura 5.26 estão representados os valores de C_f obtidos a partir do uso da Equação 3.22 para as diferentes vazões ensaiadas, em função do parâmetro y_0/b_0 , assim como o gráfico da aproximação potencial sugerida (Equação 5.3), ajustada a partir desses valores.

O fato do coeficiente de cisalhamento não apresentar um valor constante pode estar relacionado aos baixos números de Reynolds do escoamento na ranhura (entre 850 e 4300). Em canais, o escoamento é considerado turbulento a partir do número de Reynolds igual a 2000. Cabe salientar que a relação y_0/b_0 que gera um número de Reynolds acima de 2000 é a partir de 1. Outro fato a salientar é que a abertura (b_0) é de apenas 2 cm, e que aberturas inferiores a 1,5 cm podem ocasionar erros de escala na determinação dos coeficientes de cisalhamento e de descarga para escoamentos com número de Reynolds inferior 5×10^4 e número de Weber superior a 25 (Nago, 1983). Acredita-se, a partir dos valores obtidos neste trabalho, que em estudos a respeito do coeficiente de cisalhamento deva-se trabalhar com modelos de maiores dimensões, garantindo números de Reynolds maiores, procurando eliminar assim os efeitos de escala. Para valores de y_0/b_0 acima de 4 (número de Reynolds

igual a 3500) C_f aparenta ter um comportamento linear, com valores variando entre 0,10 e 0,07.

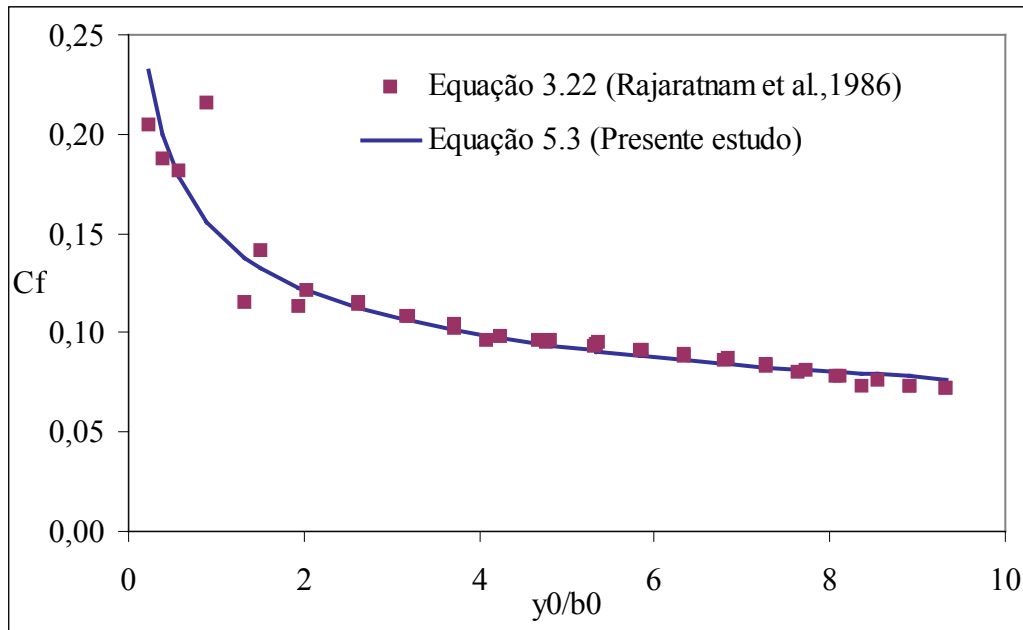


Figura 5.26. Valores de C_f calculados a partir da Equação 3.22 e a Equação 5.3, ajustada em função de y_0/b_0 .

5.3.4 Coeficiente de Descarga (C_d)

O coeficiente de descarga para escadas do tipo ranhura vertical foi definido por Clay (1995) como sendo:

$$C_d = \frac{Q}{b_0 \bar{y} \sqrt{2g\Delta g}}, \quad (3.27)$$

em que \bar{y} representa a altura d'água da base do canal à superfície d'água imediatamente a montante da abertura.

Calculando o coeficiente C_d (Equação 3.27), a partir dos dados experimentais em função de y_0/b_0 , é possível estabelecer uma curva de ajuste da seguinte forma:

$$C_d = 0,62 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)^{0,13}. \quad (5.4)$$

A curva de ajuste aqui sugerida está apresentada na Figura 5.27, assim como os valores calculados pela Equação 3.27, que a geraram. No mesmo gráfico estão representados os pontos encontrados por Rajaratnam et al. (1986).

A Figura 5.27 mostra que os valores encontrados por meio uso da Equação 5.4 para os dados obtidos neste estudo apresentaram-se, embora que com uma tendência semelhante, superiores aos dados calculados pela mesma equação a partir dos dados obtidos no estudo de Rajaratnam et al. (1986).

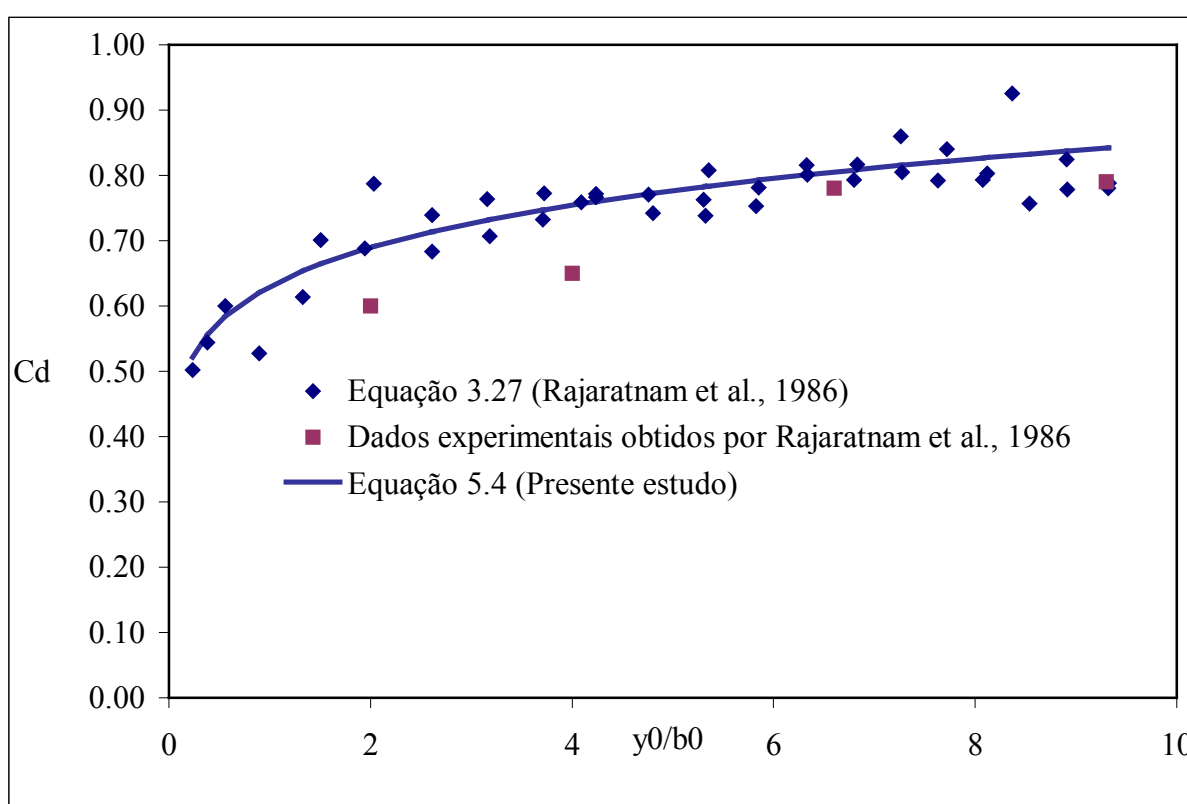


Figura 5.27. Coeficiente de descarga em função do parâmetro adimensional y_0/b_0 calculado usando-se os dados do presente estudo e os dados experimentais obtidos no estudo de Rajaratnam et al. (1986).

O fato de os valores de C_d obtidos na literatura estarem na envoltória inferior, principalmente para valores de y_0/b_0 menores que 5 ($Re < 3500$), pode estar ligado às diferenças geométricas entre as duas estruturas (salientadas na Tabela 5.3) e a possíveis efeitos de escala, favorecidos pelos baixos valores para o número de Reynolds.

A relação B/b_0 , ou seja, a largura do tanque em relação à abertura, representando o estreitamento relativo, em nosso caso, é menor do que a relação encontrada na estrutura que

serviu para os estudos de Rajaratnam et al, 1986. Esse menor estreitamento relativo também pode ser responsável por valores mais altos do coeficiente de descarga, Cd. Cabe salientar que as declividades das estruturas também são diferentes (10% e 6%), o que também deve contribuir para essa diferença.

6 Conclusões

Partindo-se do principal objetivo desta pesquisa, que foi o de conhecer o funcionamento de uma escada de peixes do tipo ranhura vertical por meio de aquisições de valores de pressão, níveis e velocidades e também por meio de visualizações do escoamento com o uso de traçadores em um dos tanques de um modelo reduzido de uma escada para peixes do tipo ranhura vertical, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

➤ Visualização do escoamento

Verificou-se a existência de velocidades no sentido vertical, principalmente no centro do vórtice à esquerda do tanque. No jato o escoamento apresentou um padrão de comportamento bidimensional, não apresentando velocidades no sentido vertical.

➤ Velocidade Média

A análise da distribuição de velocidade média confirmou os dados da bibliografia, demonstrando uma região de recirculação da água bem característica, à esquerda do tanque, e um jato, que se alarga à medida que se aproxima da superfície do escoamento. A área de recirculação à direita do escoamento principal não pôde ser bem caracterizada possivelmente por estarmos usando um equipamento com um volume de aquisição muito grande em relação ao modelo e aos fenômenos que nele acontecem.

Foram verificadas velocidades médias máximas de até 2,33 m/s, relativas à escala do protótipo, superiores às de projeto, que eram de 2 m/s.

Se comparadas às velocidades medidas no protótipo, realizadas por Viana (2005), as velocidades obtidas no presente estudo demonstraram uma distribuição muito similar, embora os valores tenham apresentado uma discrepância. Os motivos para essas diferenças podem estar ligados às diferenças entre os equipamentos e ao método de aquisição de dados, sem descartar um possível efeito de escala.

Foi possível verificar variações de velocidade no jato, principalmente nas maiores profundidades.

➤ Distribuição de pressões

Foi verificada uma diminuição do valor de pressão média na ranhura, no início da formação do jato, e uma grande flutuação nos valores de pressão em toda a área de atuação desse, com uma nova diminuição no valor médio de pressão na saída da ranhura de jusante.

No centro do vórtice foram verificadas as menores flutuações de pressão.

Houve um ligeiro aumento do valor de pressão média junto à parede do septo maior, possivelmente causado pela reservação de água que ocorre naquela região.

➤ Alturas de lâmina d'água

O perfil de alturas d'água também mostrou o acúmulo de água junto à parede do septo maior.

As menores lâminas d'água foram obtidas na saída da ranhura, na região de formação do jato, onde a velocidade atinge seus maiores valores.

Foi possível verificar também uma elevação na altura da lâmina d'água a montante das ranhuras, antes do estreitamento do canal e conseqüente formação do jato.

➤ Distribuição de pressões comparada à distribuição de velocidades médias

O vórtice de velocidades formado à esquerda do tanque coincidiu com as menores flutuações de pressão, ao passo que a região do jato coincidiu com as maiores flutuações de pressão encontradas no tanque.

➤ Vazão adimensional (Q_*)

A equação sugerida por Wu et al. (1999) apresentou melhores resultados para os dados obtidos no presente estudo em relação à equação sugerida por Rajaratnam et al. (1986), provavelmente devido ao fato de o modelo estudado pelo primeiro apresentar uma declividade de canal semelhante à declividade do modelo aqui pesquisado.

Verificou-se uma relação não linear entre os parâmetros Q_* e y_0/b_0 , assim, propôs-se a Equação 5.2 de ajuste desses parâmetros, que é válida para número de Reynolds entre 850 e 4300.

$$Q_* = 2,38 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)^{1,19} \quad (5.2)$$

➤ Coeficiente de cisalhamento (C_f)

A partir da não linearidade entre Q_* e y_0/b_0 , propôs-se a Equação 5.3, de previsão do coeficiente de cisalhamento, válida para número de Reynolds entre 850 e 4300.

$$C_f = 0.15 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)^{-0.3} \quad (5.3)$$

➤ Coeficiente de Descarga (C_d)

A partir dos dados obtidos neste estudo pôde-se relacionar o Coeficiente de descarga e o parâmetro adimensional y_0/b_0 por meio da Equação 5.4 (Reynolds entre 850 e 4300).

$$C_d = 0.62 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)^{0.13} \quad (5.4)$$

7 Recomendações

A partir da experiência gerada nesta pesquisa, faz-se as seguintes recomendações para estudos futuros, que venham a tratar dos mesmos aspectos aqui tratados:

➤ Visualização do escoamento

Para uma visualização adequada, recomenda-se a utilização de equipamentos de filmagem com uma frequência de captação compatível com a velocidade do escoamento, fato que não foi possível neste estudo.

➤ Velocidade Média

Recomenda-se um equipamento de aquisição em um tamanho compatível com o modelo, capaz de fazer medidas mais próximas das paredes e principalmente na ranhura, onde o espaço para medição é muito limitado.

➤ Distribuição de pressões

Para estudos futuros, recomenda-se análise de frequências da pressão, o que poderia trazer informações sobre possíveis fenômenos cíclicos no escoamento.

➤ Alturas d'água

A recomendação nesse caso é a mesma que para a aquisição de velocidade. O equipamento de aquisição deve chegar próximo às paredes e dentro da área da ranhura, fato que, neste estudo, só foi possível de se conseguir por meio de régua, o que garante uma menor precisão relativa à ponta linimétrica.

Para estudos futuros recomenda-se o estudo do efeito de escala, a fim de determinar escalas mínimas para a execução de modelos e o estudo das flutuações de pressão e velocidade, associadas ao comportamento dos peixes no tanque.

8 Referências Bibliográficas

- AKBARI, M. E., MITTAL, M. K., PANDE, P. K., Pressure Fluctuations on the Floor of Free and Forced Hydraulic Jumps. In: International Conference On The Hydraulic Modelling Of Civil Engineering Structures, Coventry, England. BHRA Fluid Engineering. paper C1, p. 87-96, 1982.
- BUNT, C. M., Fishway Entrance Modifications Enhance Attraction. In: Fishways For Warmwater Species: Utilization Patterns, Attraction Efficiency, Passage Efficiency And Relative Physical Output. Ph.D. Thesis. University of Waterloo, 1999.
- CHIU, E., HEATH, A. L., HEBERT, C., JONES, P., MARCO, K., SYNKOWSKI, E. C., WATERS, K., YOUNG, K., Fish Sustainability Assessing Blockages and Prioritizing Passages, Gemstone Fish Sustainability Team. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the Gemstone Program, University of Maryland, 2002.
- CHOW, V. T., Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 680p., 1959.
- CLAY, C. H., Design of Fishways and Other Fish Facilities. Dept. of Fisheries of Canada, Ottawa, 301 p, 1961.
- CLAY, C. H., Design of Fishways and other Fish Facilities. (2nd ed). Boca Raton, Lewis, 248p, 1995.
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB. Barragens e Peixes: Análise Crítica e recomendações. Boletim 116, 2003.
- CONSÓRCIO DA UHE de Igarapava, Projeto Executivo, 1998
- COSTA, F. E. S., Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS Centro de Pesquisas em Biodiversidade. In: <http://fabioescosta.sites.uol.com.br/>, acessado em fevereiro de 2005.
- D'HEYGERE, T., GOETHALS, P., Construction of Natural Flooding Areas and Fish Migration Channels in the Zwalm River Basin, 2nd International PhD Symposium in Civil Engineering, 1998.

- GODOY, M. P. Elementos de Biologia de Peixes. Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A. – ELETROSUL. Acessoria para Meio Ambiente (AMA). 1985.
- ITAIPU BINACIONAL. <http://www.itaipu.gov.br/>, acessado em janeiro de 2005.
- KAMULA, R., Flow over Weirs with Application to Fish Passage Facilities, Department of Process and Environmental Engineering, University of Oulu, Finlândia, 2001.
- KATOPODIS, C., Introduction to Fishway Design, Freshwater Institute, Central and Arctic Region, Department of Fisheries and Oceans, ,Winnipeg, Manitoba, Canada, 1992.
- KIM, J. H., Hydraulic Characteristics by Weir Type in a Pool-Weir Fishway. Ecological Engineering 16, p. 425-433, 2001
- LARINIER, M., Dams and Fish Migration. Institut of Mecanique des Fluides, Toulouse, France, 2000.
- LEI 12.488, de 9/4/1997 do Estado de Minas Gerais.
- 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. Belo Horizonte, MG, 2004
- MARTINS, S. L., Sistemas para a Transposição dos Peixes, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP, 2000.
- SFAKIOTAKIS, M., LANE D. M., DAVIES, J. B.C., Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion, IEEE Journal of Oceanic Engineering 24, no. 2, 237–52. 1999.
- NAGO, H., Discharge Coefficient of Underflow Gate in Open Chanel. 138p. Okayama University, Okayama, Japan, 1983.
- PINHEIRO, A., Avaliação da Eficácia das Passagens para Peixes de P.A.H. e das Alterações Ecológicas da Ictiofauna Local, Palestra ministrada no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- PORCHER, J. P., TRAVADE, F., Fishways: Biological Basis, Limits and Legal Considerations. Bull. Fr. Pêche Piscic. 364 suppl.: 9-20, 2002.

- RAJARATNAM, N., KATOPODIS C., SOLANKI S., New Designs for Vertical Slot Fishways. Tech. Rep. WRE 89-1, Dept. of Civil Eng, University of Alberta, Edmonton. 50 p, 1989.
- RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C., Hydraulics of Denil Fishways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110 (9), 1219-1233, 1984.
- RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C., Hydraulics of Vertical Slot Fishways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 112, No 10, 1986.
- RAJARATNAM, N., KATOPODIS, WU, S., SABUR, A., Hydraulics of Resting Pools For Denil Fishways. Journal of Civil Engineering. Volume 123, 1997.
- RAKOWITZ, G., ZWEIMÜLLER, I., Influence of Diurnal Behaviour Rhythms and Water-Level Fluctuations on the Migratory Activities of Fish in a Backwater of the River Danube: a Hydroacoustic Study Institute of Ecology and Conservation Biology, Department of Limnology, University of Vienna, Althanstr. Vienna, Austria, 2000
- SANTOS, H. A., Metodologia de Medição de Velocidade Prolongada Crítica e de Explosão das Espécies de Peixes Migradoras do Brasil. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte – MG, 2004.
- SCHIOZER, D., Mecânica dos Fluidos, 2º edição. LTC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1996.
- TOSO, J. W., BOWERS, C. E., Extreme Pressure in Hydraulic Jump Stilling Basins. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 114, n. 8, p. 829-843, 1988.
- U. S. Corps for Engineering , In: <http://www.nwd.usace.army.mil/ps/gassat.htm>, acessado em fevereiro de 2005.
- 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.
- WU, S., RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C.,. Structure of flow in Vertical Slot Fishway. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 125. 1999.

