

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**A INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE NATATÓRIA DE PEIXES**  
**NEOTROPICAIS NO PROJETO HIDRÁULICO DE**  
**MECANISMOS DE TRANSPOSIÇÃO**

**Hersília de Andrade e Santos**

**Belo Horizonte**

**2007**

**A Influência da Capacidade Natatória de Peixes  
Neotropicais no Projeto Hidráulico de Mecanismos de  
Transposição**

**Hersília de Andrade e Santos**

# **A Influência da Capacidade Natatória de Peixes Neotropicais no Projeto Hidráulico de Mecanismos de Transposição**

Tese apresentada por Hersília de Andrade e Santos ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Sistemas Hidroenergéticos

Orientador: Carlos Barreira Martinez

Co-orientador: Paulo dos Santos Pompeu

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2007

S237i Santos, Hersília de Andrade e  
A influência da capacidade natatória de peixes neotropicais no projeto hidráulico de mecanismos de transposição [manuscrito] / Hersília de Andrade e Santos . — 2007. xvii, 179 f., enc. : il.

Orientador: Carlos Barreira Martinez  
Co-orientador: Paulo dos Santos Pompeu

Tese (doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 170-179

1. Peixes - Migração - Teses. 2. Peixes - Locomoção - Teses. 3. Engenharia sanitária - Teses. I. Martinez, Carlos Barreira. II. Pompeu, Paulo dos Santos. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 626.882 (043)

*Ficha elaborada pelo Processamento Técnico da Biblioteca da EE/UFMG*



## FOLHA DE APROVAÇÃO

A Influência da Capacidade Natatória de Peixes Neotropicais no Projeto Hidráulico de Mecanismos de Transposição

**HERSÍLIA DE ANDRADE E SANTOS**

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

  
Prof. CARLOS BARREIRA MARTINEZ

  
Prof. PAULO DOS SANTOS POMPEU

  
Prof. GILBERTO CALDEIRA BANDEIRA DE MELO

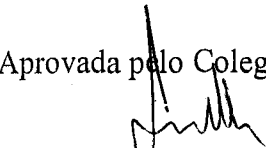
  
Prof. ALEXANDRE DE LIMA GODINHO

  
DOMINGO RODRIGUEZ FERNANDEZ

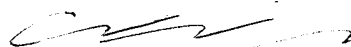
  
Prof. MARCELO GIULIAN MARQUES

  
Prof. JOSÉ CARLOS CÉSAR AMORIM

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

  
Prof. Léo Heller  
Coordenador

Versão Final aprovada por

  
Prof. Carlos Barreira Martinez  
Orientador

Belo Horizonte, 30 de março de 2007.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é o resultado da soma de várias colaborações. Só assim ele se tornou possível. Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao prof. Carlos Barreira Martinez pela amizade, pelo carinho e pelo seu profissionalismo em transformar as mais complexas idéias em realidade. Somando-se ao seu trabalho, sempre esteve meu co-orientador prof. Paulo Pompeu, o qual serei eternamente grata pelo carinho, pela dedicação e por me ensinar a traçar os caminhos da pesquisa.

Agradeço meus pais, Ayrton e Maria Alice, que com seu carinho e apoio foram e são minha base. À eles, todo o meu amor. Agradeço também aos meus irmãos, Hugo e Isabel, pela amizade e pela compreensão da ausência durante a fase de teste da pesquisa.

Esta pesquisa não seria possível sem financiamento da CEMIG, por meio de programas de P&D. Agradeço a todos que participaram destes programas, especialmente o biólogo João Magalhães pela profissionalismo e pelo carinho que sempre tratou o trabalho.

Agradeço aos bolsistas que participaram e os que ainda participam deste trabalho: Livia, Lincoln, Rodrigo e Paula. Em especial, agradeço ao César que tanto me ajudou nos momentos que mais eu precisei no CPH. Obrigada aos funcionários do CPH: Geraldo, Paulinho e Vicente, que juntos fizeram as idéias tomarem formas, mesmo a custa de penosas mudanças repentinas.

Sou eternamente grata aos amigos e companheiros de sala: prof<sup>a</sup>. Edna, Viviane, Luiz Gustavo, Luiz Felipe, Cláudia e Giuseppe, pois nas horas alegres e tristes foram grandes conselheiros ouvindo meus desabafos. Agradeço também os biólogos Carlos Bernardo Mascarenhas, Fábio Vieira, Volney Vono pelo companheirismo e pelos momentos de alegria e aos prof. Alexandre Godinho e prof. Hugo Godinho pelo exemplo e conselhos. À Gisele, secretária do Centro de Transposição de Peixes. Sou grata também a todos amigos do CPH, que me ajudaram nas mais diferentes etapas deste trabalho: Iara, Cristiane, Paulo Henrique, Enóe e prof. Leonardo. Muito obrigada ao Matthias, que tanto me ajudou nas simulações no curto tempo que estive na Alemanha.

Enfim gostaria de agradecer às pessoas mais motivadoras desta tese, os pescadores Milton e Rosângela, que mesmo passando por mortandades e outras dificuldades se mostraram verdadeiros doutores da vida. A todos vocês minha gratidão.

## RESUMO

Atualmente a legislação de alguns estados brasileiros obriga um estudo da necessidade de implantação de passagens de peixes em barramentos. Entretanto, muitos dos dispositivos aqui já construídos não levam em consideração a capacidade natatória de nossos peixes, sendo os mesmos baseados em projetos desenvolvidos na América do Norte e Europa. Muitas dessas obras estrangeiras foram concebidas para peixes como salmão, truta e enguias, cujas características são bem diferentes dos peixes tropicais, entre elas a capacidade natatória. Esta por sua vez é uma característica de extrema importância pois além de condicionar o dimensionamento hidráulico do próprio Mecanismo de Transposição de Peixes (MTP), condiciona o projeto de estruturas auxiliares como canal de entrada, de saída e água de atração. No entanto, atualmente na América Latina pouco se tem estudado sobre a correlação entre a capacidades natatória de nossa ictiofauna.

Assim, este trabalho tem como objetivo levantar as curvas de capacidade natatória de alguns peixes sul-americanos, pertencentes a gêneros representativos de nossa fauna migradora, e propor alterações no projeto hidráulico de MTP, a serem construídos no Brasil.

Para obtenção dessas curvas, reproduziu-se algumas metodologias em túneis hidrodinâmicos construídos no Centro de Pesquisas Hidráulicas. As velocidades medidas foram a velocidade crítica e a velocidade prolongada. Os procedimentos experimentais consistem em confinar os peixes nos túneis e forçá-los a nadar contra o escoamento gerado por bombas centrífugas. Assim, para a determinação da velocidade crítica, o escoamento é aumentando periodicamente, dentro de um intervalo fixo de tempo, até a fadiga do peixe. Já para o levantamento do modo prolongado, o peixe nada em um escoamento permanente sendo verificado o tempo de natação do mesmo em tal velocidade.

As espécies escolhidas: *Pimelodus maculatus*, *Leporinus reinhardti* e *Prochilodus costatus*; pertencem à bacia do São Francisco e suas velocidades servirão de base para análise dos diferentes critérios de dimensionamentos das escadas de peixes, que fornecerão por sua vez a velocidade máxima do escoamento destes MTP. Dessa forma avaliou-se o atendimento das demandas destas espécies na escada da UHE Igarapava. Para isto utilizou-se métodos numéricos que forneceram os valores de velocidade do escoamento em diferentes pontos da escada.

## ABSTRACT

The legislation of some Brazilian states nowadays obliges the study of the necessity of fishway construction in waterway barriers. Therefore, many fish ladders and lifts have been constructed on main Brazilian rivers but there has never been a concern about our fish swimming capability. They are based on Europeans, Canadian and American built fishways, designed to pass salmons, eels and trout. However, the Brazilian fishes are very different from this fish and therefore, have different swimming capability. This characteristic is the most important to the hydraulic project of fishway and auxiliary structures, such as entrance, exits and attraction water. But unfortunately the neotropical swimming capability is unknown because of the lack of study about it.

Therefore, my proposal is to determine the swimming speed of some neotropical species, whose genus are common in our migratory ictiofauna, and to propose the possible changes, based on our fish swimming, in the hydraulic project of fishway which can be constructed in Brazil.

In order to obtain the fish velocity, some methodology are reproduced in two respirometers, built in the Centro de Pesquisas Hidráulicas. Two kinds of swimming speed are measured: critical speed and prolonged speed. The fish is forced to swim, inside a water tunnel, against current water that is generated by a pump. The proceeding of critical velocity is to raise the water flow until the fish fatigue. To determine the prolonged mode, the fish swim in permanent flow until its fatigue, when its swimming time is taken.

The chosen species: *Pimelodus maculatus*, *Leporinus reinhardti* and *Prochilodus costatus*; come from the São Francisco basin. Its speeds are going to be the base to analyze the criteria of fishladder project, which will give the maximum flow speed. Therefore, I evaluated if the fishladder from UHE Igarapava is able to permit the studied fish passage, according to the criteria, and to propose. The numerical method was used to build the velocity profile inside this fish ladder.



## SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELA.....	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	7
1.2.1. <i>Objetivo Geral</i> .....	7
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	7
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
2.1 PEIXES E SUAS CARACTERÍSTICAS DE LOCOMOÇÃO .....	9
2.1.1 <i>Locomoção dos peixes</i> .....	9
2.1.2 <i>Estudos sobre a capacidade hidrodinâmica e natatória dos peixes</i> .....	24
2.1.3 <i>Hidrodinâmica do nado</i> .....	36
2.1.4 <i>Peixes migradores neotropicais</i> .....	51
2.2 FUNCIONAMENTO E DIMENSIONAMENTO DAS ESCADAS DO TIPO SLOT VERTICAL .....	58
2.2.1 <i>Dimensionamento das escadas do tipo slot vertical</i> .....	58
2.2.2 <i>Uso de parâmetros natatórios em critérios de dimensionamento de escadas de peixes</i> .....	62
2.2.3 <i>Simulação numérica do escoamento dentro de canais livres</i> .....	69
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>71</b>
3.1 TESTES DE CAPACIDADE NATATÓRIA .....	71
3.1.1 <i>Espécies escolhidas</i> .....	71
3.1.2 <i>Coleta e manutenção</i> .....	72
3.1.3 <i>Aparato experimental</i> .....	74
3.1.4 <i>Procedimento experimental</i> .....	87
3.1.5 <i>Correções e incertezas da velocidade</i> .....	96
3.1.6 <i>Análise estatística</i> .....	104

3.2 ADEQUAÇÃO DAS ESCADAS DE SLOT VERTICAL À CARACTERÍSTICAS DOS PEIXES NEOTROPICAIS.....	106
3.2.1 Dimensionamento de escadas do tipo slot vertical a partir de critérios natatórios considerando a capacidade dos peixes neotropicais.....	106
3.2.2 Avaliação das alterações nos parâmetros hidráulicos e construtivos das escadas de slot vertical considerando características dos peixes neotropicais .....	106
3.2.3 Simulação numérica e obtenção dos caminhos preferenciais para peixes neotropicais .....	108
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>112</b>
4.1 CAPACIDADE NATATÓRIA .....	112
4.1.1. Velocidade crítica.....	112
4.1.2. Velocidade prolongada .....	126
4.1.3. Velocidade de explosão .....	134
4.1.4. Dados biométricos.....	141
4.1.5. Incertezas de medição .....	145
4.2 APLICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS PEIXES NEOTROPICAIS NO PROJETO DE ESCADAS DO TIPO SLOT VERTICAL .....	146
4.2.1. Características hidráulicas das escadas do tipo slot vertical obtidas a partir de critérios natatórios e que consideram a capacidade de peixes neotropicais.....	146
4.2.2. Variações dos parâmetros hidráulicos e construtivos com a utilização das características dos peixes neotropicais.....	149
4.2.3 Caminhos preferenciais para peixes neotropicais dentro de escadas do tipo slot vertical .....	152
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>158</b>
<b>6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>169</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>170</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

**AHE**- Aproveitamento Hidrelétrico

**BCF**- *Body and caudal fin propulsion* (propulsão utilizando a nadadeira caudal e o corpo)

**CPH**- Centro de Pesquisas Hidráulicas e de Recursos Hídricos da UFMG

**CEMIG** - Companhia Energética de Minas Gerais

**CL**-Camada limite

**MPF** – *Median and paired fin propulsion* (propulsão utilizando as nadadeiras pares e medianas)

**MTP** – Mecanismo de transposição de peixes

**PIV**- *Particle Image Velocity* (velocimetria por imagem de partícula)

**UHE** – Usina Hidrelétrica

$A$ - área de um objeto ( $m^2$ )

$A_p$  – área planificada ( $m^2$ )

$b$ - comprimento da envergadura (m)

$b_o$ -abertura da ranhura (m)

$B$ - coeficiente multiplicador das variáveis independentes e do intercepto no modelo ajustado

$Beta$ - coeficiente de correlação das variáveis independentes

$C$  – área transversal da seção de teste

$C_a$  – coeficiente de arrasto

$C_c$  – correção combinada

$C_p$  – distribuição de pressão sobre a superfície de um objeto

$C_s$  – coeficiente de sustentação

$CP$ - comprimento padrão do peixe (m)

$CT$ - comprimento total do peixe(m)

$D$ -diâmetro ou largura interna da seção de teste

$d$ - rugosidade absoluta (mm)

$D_E$ -distância de explosão (m)

$D_H$ -distância capturada pelo espelho nos testes de explosão (m)

$D_v$ -distância capturada pela filmagem direta do aquário nos testes de explosão (m)

$DN$ - diâmetro nominal

$e$ -espessura de um objeto (m)

$f$ - frequência de batimento da cauda do peixe (Hz)

$F_a$  - força de arrasto (N)

*F*- velocidade adimensionalizada  
*FC*-fator de condição( $\text{kg/m}^3$ )  
*F<sub>f</sub>*– velocidade adimensionalizada  
*F<sub>s</sub>*- força de sustentação (N)  
*g*- gravidade ( $\text{m/s}^2$ )  
*H*- profundidade em relação à linha d'água  
*k*-fator de abrangência  
*K<sub>3</sub>* - fator adimensional de forma de corpo (do peixe)  
*l*- comprimento de um objeto (m)  
*L*- amplitude do batimento da cauda do peixe (m)  
*M*-massa de um corpo qualquer  
*N* ou *n*-número de medidas  
*p* ou *P*-valor- nível de significância ou nível descritivo  
*pH*- potencial de íons de hidrogênio  
*P<sub>i</sub>* – pressão de entrada da seção de teste (Pa)  
*P<sub>e</sub>* – pressão de saída da seção de teste (Pa)  
*PC*-peso corporal do peixe (kg)  
*q*- valores medidos de uma variável qualquer  
*Q*- vazão( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
*Q\**-vazão adimensional  
*R*- coeficiente de correlação  
*R<sup>2</sup>* – coeficiente de determinação múltipla  
*R<sub>aj</sub><sup>2</sup>*- coeficiente ajustado de determinação múltipla  
*Re*- número de Reynolds  
*RE*-repetitividade  
*s*-desvio padrão  
*S<sub>o</sub>*-inclinação da escada (m/m)  
*St*- número de Strouhal  
*t*- distribuição *t-student*  
*t*- tempo de fadiga (s)  
*t\** - Tempo de fadiga adimensionalizado  
*t<sub>i</sub>*- intervalo de tempo de alteração da velocidade do escoamento(min ou s)  
*t<sub>f</sub>*– tempo dentro do intervalo que o peixe nadou (min ou s)  
*T<sub>d</sub>* - Tendência

$u$ - incerteza padrão  
 $u(x)$ - velocidade pontual (m/s)  
 $u_c$ -velocidade média no modo natação explosão e descanso (m/s)  
 $u_{comb}$ -incerteza combinada  
 $u_f$ -velocidade final no modo natação explosão e descanso (m/s)  
 $u_i$ - velocidade inicial no modo natação explosão e descanso (m/s)  
 $U$ - velocidade média (m/s)  
 $U_e$ - velocidade final na seção de teste (m/s)  
 $U_{exp}$ - incerteza expandida  
 $U_i$ - velocidade inicial na seção de teste (m/s)  
 $U_{max}$ - velocidade máxima mantida pelo peixe no aparato (m/s)  
 $U_o$  – velocidade fora da esteira de um objeto dentro de uma seção de teste (m/s)  
 $U_p$ - velocidade da esteira de um propulsor (m/s)  
 $U_s$  – velocidade em torno de objeto dentro de uma seção de teste (m/s)  
 $U_w$  – velocidade na esteira (m/s)  
 $VB$ - valor bruto da incerteza  
 $V$ - velocidade de um objeto/fluido qualquer (m/s)  
 $V_{corrigida}$  – Velocidade do peixe corrigida (m/s)  
 $V_{crit}$ - Velocidade crítica (m/s)  
 $V_{max}$ - Velocidade máxima desenvolvida por um peixe (m/s)  
 $V_{medida}$  – Velocidade do peixe medida (m/s)  
 $V_{peixe}$  –Volume do peixe (m<sup>3</sup>)  
 $X$ - Distância nadada por um peixe (m)  
 $y_o$ - altura da lâmina d'água dentro da escada  
 $\bar{y}$  -altura media da lâmina d'água dentro da escada  
 $\alpha$ - nível de significância  
 $\Delta U$ - incremento da velocidade (m/s)  
 $\Delta h$ - variação do nível d'água entre piscinas ou *slots* adjacentes(m)  
 $\varepsilon$ -distância maximilizada adimensionalizada  
 $\kappa$ -dissipação de energia dentro da escada (kW/m<sup>3</sup>)  
 $\mu$  – viscosidade dinâmica do fluido (Kg/ms)  
 $\nu$ - graus de liberdade  
 $\nu_{ef}$ - graus de liberdade efetivo

$\rho_{\text{água}}$  – massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{\text{peixe}}$  – massa específica do peixe ( $\text{kg/m}^3$ )

$\tau_l$ . fator adimensional sobre a forma da seção de teste

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1-</b> Alterações no afluente do rio Cipó na Serra do Cipó (Minas Gerais).....	2
<b>FIGURA 1.2-</b> (a) Escada do tipo ranhura vertical na AHE Aimorés (b) Detalhe das piscinas da escada da AHE .....	3
<b>FIGURA 1.3-</b> Esquema de uma eclusa de peixes.....	4
<b>FIGURA 1.4-</b> Esquema de um elevador de peixes.....	5
<b>FIGURA 2.1-</b> Indivíduo da família Clariidae realizando locomoção terrestre .....	11
<b>FIGURA 2.2-</b> (a) <i>Periophthalmus sp.</i> ( b) <i>Periophthalmus modestus</i> .....	11
<b>FIGURA 2.3-</b> (a) <i>Astroblepus rosei</i> (b) Boca do <i>Astroblepus rosei</i> .....	12
<b>FIGURA 2.4</b> – <i>Lepidosiren paradoxa</i> (pirambóia) .....	13
<b>FIGURA 2.5</b> – <i>Pogonopoma wertheimeri</i> (cascudo preto do rio Mucuri).....	13
<b>FIGURA 2.6</b> - Nadadeiras de <i>Leporinus obtusidens</i> .....	15
<b>FIGURA 2.7-</b> Descrição dos padrões de locomoção ( <i>gait</i> ) da natação com respectivos propulsores, velocidades e músculos utilizados .....	17
<b>FIGURA 2.8-</b> Classificação, quanto ao modo de propulsão, atualmente utilizada .....	19
<b>FIGURA 2.9-</b> Arranjo regular de um cardume.....	21
<b>FIGURA 2.10-</b> Curva de velocidades do modo de natação de explosão e descanso de um Bacalhau .....	23
<b>FIGURA 2.11-</b> Diagramas de Borelli: na esquerda funcionamento da bexiga natatória e na direita a explicação da natação .....	25
<b>FIGURA 2.12-</b> Aparato de Morerau para estudar o efeito de mudanças de pressão no volume do peixe .....	26
<b>FIGURA 2.13-</b> Aparato de Morerau para identificar os músculos capazes de alterar o volume da bexiga natatória.....	27
<b>FIGURA 2.14-</b> Aparato de Houssay para medir velocidade de natação dos peixes .....	28
<b>FIGURA 2.15-</b> Perspectiva da roda de peixes.....	32
<b>FIGURA 2.16-</b> Diagrama transversal do aparato de canal circular móvel.....	32
<b>FIGURA 2.17-</b> Aparato desenvolvido por Bishai em 1960 .....	33
<b>FIGURA 2.18-</b> Aparato desenvolvido por Blazka, Volf e Cepala em 1960 .....	33
<b>FIGURA 2.19-</b> Aparato desenvolvido por Brett em 1964.....	34
<b>FIGURA 2.20-</b> Aparato desenvolvido por Thomas, Burrows e Chenoweth em 1964.....	34
<b>FIGURA 2.21-</b> Aparato utilizado para determinação da velocidade crítica do <i>Micropterus Dolomieu</i> .....	35

<b>FIGURA 2.22-</b> (a) Forças decorrentes da gravidade e da pressão do fluido (b) Forças decorrentes do deslocamento do peixe ou da água sobre o corpo do peixe .....	36
<b>FIGURA 2.23-</b> Empuxo no peixe .....	37
<b>FIGURA 2.24-</b> Partículas do fluido passando pelo aerofólio.....	39
<b>FIGURA 2.25-</b> Hidrofólio e suas partes .....	39
<b>FIGURA 2.26-</b> (a) Formação de vórtices em um hidrofólio (b) Vórtices nas nadadeiras peitorais e na cauda do peixe.....	40
<b>FIGURA 2.27-</b> Diferença de pressão entre a parte anterior e posterior de um peixe visto em planta. Azul alta pressões e vermelho baixas pressões.....	41
<b>FIGURA 2.28</b> -Comparação dos escoamentos em torno e uma placa aguda com número de Reynolds baixo e alto: (a) escoamento com Re baixo (b) escoamento com Re alto .....	42
<b>FIGURA 2.29-</b> Coeficiente de arrasto para diferentes números de Reynolds e para diferentes rugosidades sobre placas .....	43
<b>FIGURA 2.30-</b> Gradiente de pressão adverso: a) separação da camada limite e b) refluxo ...	44
<b>FIGURA 2.31-</b> Escoamento em torno de um cilindro a) separação laminar b) separação turbulenta c) distribuições de pressão.....	45
<b>FIGURA 2.32-</b> Rugosidade de um cascudo .....	46
<b>FIGURA 2.33-</b> Importância da carenagem na redução do arrasto de um corpo .....	46
<b>FIGURA 2.34-</b> a) e b) Vórtices formados no escoamento passando por diferentes corpos c) vórtices formados pelo batimento da cauda do peixe.....	47
<b>FIGURA 2.35-</b> Estudo do número de Strouhal feito para diferentes tipos de peixes e Mamíferos.....	49
<b>FIGURA 2.36-</b> Principais bacias da América do Sul .....	50
<b>FIGURA 2.37-</b> Ciclo de vida das principais espécies migradoras brasileiras.....	52
<b>FIGURA 2.38-</b> Espécies de peixes da ordem characiformes .....	53
<b>FIGURA 2.39-</b> Espécie de peixe da ordem siluriformes.....	54
<b>FIGURA 2.40-</b> Variáveis hidráulicas das escadas do tipo slot vertical.....	60
<b>FIGURA 2.41-</b> Corte longitudinal na escada do tipo slot vertical .....	60
<b>FIGURA 2.42-</b> Fluxograma do dimensionamento de uma escada do tipo slot vertical .....	62
<b>FIGURA 2.43-</b> Equação linear da velocidade de nado do peixe em função da velocidade máxima do escoamento .....	64
<b>FIGURA 2.44-</b> Proporção de subidas com sucesso para vários escoamentos.....	65



<b>FIGURA 2.45-</b> Gráfico de $F_f \times t^*$ para o grupo dos nadadores subcarangiformes (prolongada e explosão) e anguiliformes (prolongada) .....	66
<b>FIGURA 2.46-</b> Gráfico de $F \times \varepsilon$ para o grupo dos nadadores subcarangiformes (prolongada e explosão) e anguiliformes (prolongada) .....	67
<b>FIGURA 2.47-</b> Gráfico da velocidade do escoamento x distância para o grupo dos nadadores subcarangiformes.....	68
<b>FIGURA 3.1-</b> Container para transporte dos peixes.....	73
<b>FIGURA 3.2-</b> Aquário de manutenção dos piaus .....	74
<b>FIGURA 3.3-</b> Esquema do aparato de DN 150 mm.....	76
<b>FIGURA 3.4-</b> Medidor de vazão eletromagnético .....	77
<b>FIGURA 3.5-</b> Vista geral da seção de teste .....	77
<b>FIGURA 3.6-</b> Tela feita de fio de cobre para confinamento do peixe na seção de teste.....	78
<b>FIGURA 3.7-</b> Esquema da tubulação rígida do terceiro aparato.....	78
<b>FIGURA 3.8-</b> a) Soquete das conexões Tê b) vista interna da conexão com o soquete moldando a seção de passagem do escoamento e da grade.....	79
<b>FIGURA 3.9-</b> Tomadas de pressão e manômetros .....	79
<b>FIGURA 3.10-</b> Registro gaveta de saída do aparato .....	80
<b>FIGURA 3.11-</b> Inversores de Frequência Siemens e Weg.....	80
<b>FIGURA 3.12-</b> Esquema do aparato de DN 250 mm.....	82
<b>FIGURA 3.13-</b> Sistema de bombeamento do aparato 2 .....	83
<b>FIGURA 3.14-</b> Laminador do aparato 2.....	83
<b>FIGURA 3.15-</b> Seção de teste do aparato 2.....	84
<b>FIGURA 3.16-</b> Detalhe da movimentação da tela de jusante.....	84
<b>FIGURA 3.17-</b> (a) Cruzeta para introdução e retirada do peixe (b) Registro gaveta de saída .....	84
<b>FIGURA 3.18-</b> Painel de acionamento das bombas .....	85
<b>FIGURA 3.19-</b> Aparato para determinação da explosão.....	86
<b>FIGURA 3.20-</b> <i>Astyanax bimaculatus</i> com indicações dos tipos de comprimentos medidos.....	89
<b>FIGURA 3.21</b> – Tempo de transição entre tipos de velocidade .....	92
<b>FIGURA 3.22-</b> Distância vertical obtida através do espelho .....	94
<b>FIGURA 3.23-</b> Distância vertical obtida através da observação do aquário.....	95
<b>FIGURA 3.24-</b> Seqüência de uma explosão.....	95
<b>FIGURA 3.25-</b> Efeitos decorrentes de medições em túneis hidrodinâmicos .....	96

<b>FIGURA 3.26-</b> Gráfico para determinação de K3 .....	98
<b>FIGURA 3.27-</b> Fases da simulação .....	106
<b>FIGURA 3.28-</b> Perfis de velocidade obtidos para altura de 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 cm do fundo do canal .....	110
<b>FIGURA 3.29-</b> Plano transversal (preto) e plano longitudinal (vermelho) .....	111
<b>FIGURA 4.1-</b> Box plot de oxigênio dissolvido .....	112
<b>FIGURA 4.2-</b> Oxigênio Dissolvido x Velocidade Crítica.....	113
<b>FIGURA 4.3-</b> Variações de temperatura nos ensaios de velocidade crítica.....	114
<b>FIGURA 4.4-</b> pH dos ensaios de velocidade crítica.....	114
<b>FIGURA 4.5-</b> Classe de tamanho para o mandi .....	115
<b>FIGURA 4.6-</b> Classe de tamanho para o piau .....	115
<b>FIGURA 4.7-</b> Classe de tamanho para a curimba .....	116
<b>FIGURA 4.8-</b> Ln (Velocidade crítica) x Ln (Comprimento total) .....	117
<b>FIGURA 4.9-</b> Ln (Velocidade crítica) x Ln (Comprimento padrão).....	117
<b>FIGURA 4.10-</b> Ln (Velocidade crítica) x Ln (Peso) .....	118
<b>FIGURA 4.11-</b> Curvas de Velocidade crítica x Comprimento para espécies neotropicais e as encontradas em clima temperado .....	123
<b>FIGURA 4.12-</b> Curvas de Velocidade crítica x Comprimento para espécies o piau em diferentes temperaturas e os salmões ( <i>Salmo Salar</i> e <i>Oncorhynchus nerka</i> )	123
<b>FIGURA 4.13-</b> Obstrução do escoamento pelo peixe .....	124
<b>FIGURA 4.14-</b> Box-plot da pressão à montante da seção de teste.....	125
<b>FIGURA 4.15-</b> Gráfico da velocidade crítica x pressão à montante da seção de teste do aparato de DN 150mm.....	125
<b>FIGURA 4.16-</b> Gráfico da velocidade crítica x pressão à jusante da seção de teste do aparato de DN 150 mm .....	126
<b>FIGURA 4.17-</b> Oxigênio dissolvido medido nos ensaios de velocidade prolongada .....	127
<b>FIGURA 4.18-</b> Temperatura medida nos ensaios de velocidade prolongada para.....	127
<b>FIGURA 4.19-</b> Classes de tamanho do piau.....	128
<b>FIGURA 4.20-</b> Classes de tamanho do mandi .....	128
<b>FIGURA 4.21-</b> Classes de tamanho da curimba.....	129
<b>FIGURA 4.22-</b> Tempo de fadiga x velocidade prolongada para o piau .....	130
<b>FIGURA 4.23-</b> Tempo de fadiga x velocidade prolongada para o mandi.....	130
<b>FIGURA 4.24-</b> Tempo de fadiga x velocidade prolongada para a curimba .....	131
<b>FIGURA 4.25-</b> Tempo de fadiga x velocidade prolongada para as três espécies .....	131

<b>FIGURA 4.26</b> - Percentual de pias fadigadas x tempo de fadiga por classes de velocidade .....	132
<b>FIGURA 4.27</b> - Percentual de mandis fadigados x tempo de fadiga por classes de velocidade.....	133
<b>FIGURA 4.28</b> - Percentual de curimbas fadigadas x tempo de fadiga por classes de velocidade.....	133
<b>FIGURA 4.29</b> -Velocidade prolongada x tempo de fadiga para as três espécies.....	134
<b>FIGURA 4.30</b> - Velocidades de explosão (comp/s) separada por indivíduo para piau.....	135
<b>FIGURA 4.31</b> - Velocidade de explosão (comp/s) x duração da explosão para o piau .....	135
<b>FIGURA 4.32</b> - Velocidade de explosão (m/s) x duração da explosão para o piau .....	136
<b>FIGURA 4.33</b> - Velocidades de explosão (comp/s) separada por indivíduo para curimba ...	138
<b>FIGURA 4.34</b> - Velocidade de explosão (m/s) x duração da explosão para a curimba .....	138
<b>FIGURA 4.35</b> - Velocidade de explosão (m/s) x duração da explosão para a curimba .....	139
<b>FIGURA 4.36</b> -Largura x comprimento total da curimba .....	141
<b>FIGURA 4.37</b> -Largura x comprimento padrão da curimba .....	142
<b>FIGURA 4.38</b> -Largura x comprimento total do piau.....	142
<b>FIGURA 4.39</b> -Largura x comprimento padrão do piau .....	143
<b>FIGURA 4.40</b> -Largura x comprimento total do mandi .....	143
<b>FIGURA 4.41</b> -Largura x comprimento padrão do mandi .....	144
<b>FIGURA 4.42</b> - Incerteza da velocidade crítica .....	145
<b>FIGURA 4.43</b> - Incerteza da velocidade prolongada .....	146
<b>FIGURA 4.44</b> - Ajuste para os valores adimensionalizados de velocidade ( $F_i$ ) e tempo de fadiga ( $t^*$ ) para o mandi.....	147
<b>FIGURA 4.45</b> - Ajuste para os valores adimensionalizados de velocidade ( $F_i$ ) e tempo de fadiga ( $t^*$ ) para o piau.....	148
<b>FIGURA 4.46</b> - Ajuste para os valores adimensionalizados de velocidade ( $F_i$ ) e tempo de fadiga ( $t^*$ ) para a curimba.....	148
<b>FIGURA 4.47</b> - Velocidade máxima x inclinação para abertura do slot de 40 cm .....	149
<b>FIGURA 4.48</b> - Volume da escada x inclinação para abertura do slot de 40 cm .....	150
<b>FIGURA 4.49</b> - Velocidade máxima x abertura do slot para inclinação de 6% .....	150
<b>FIGURA 4.50</b> -Volume de concreto do canal x abertura do slot para inclinação de 6% .....	151
<b>FIGURA 4.51</b> -Perfil longitudinal a 5cm do fundo da escada considerando a velocidade prolongada máxima de um mandi no comprimento de primeira maturação	153

<b>FIGURA 4.52-</b> a) Vista em perspectiva do plano passando pela ranhura -b) Vista em planta .....	153
<b>FIGURA 4.53-</b> Áreas viáveis de passagens considerando a velocidade prolongada máxima .....	154
<b>FIGURA 4.54-</b> Áreas viáveis de passagens considerando a velocidade crítica .....	155
<b>FIGURA 4.55-</b> Áreas viáveis de passagens considerando a velocidade de explosão .....	155
<b>FIGURA 4.56-</b> Áreas viáveis no plano longitudinal considerando a velocidade máxima prolongada .....	156
<b>FIGURA 4.57-</b> Áreas viáveis no plano longitudinal considerando a velocidade crítica.....	157

## LISTA DE TABELA

<b>TABELA 2.1-</b> Distribuição e número total de espécies (N) dos gêneros <i>Prochilodus</i> , <i>Leporinus</i> e <i>Pimelodus</i> na região Neotropical.....	53
<b>TABELA 2.2-</b> Ordens e famílias das principais espécies de peixes encontradas no Brasil ....	55
<b>TABELA 2.3-</b> Tipos de reprodução em peixes tropicais de água doce.....	57
<b>TABELA 2.4-</b> Modelos de escadas do tipo slot vertical (Rajaratnam, Van der Vinne e Katopodis, 1986) .....	59
<b>TABELA 2.5-</b> Valores de inclinação indicados .....	60
<b>TABELA 2.6-</b> Valores de profundidade mínima (m) para espécies de clima temperado .....	61
<b>TABELA 3.1-</b> Espécies escolhidas para estudos .....	72
<b>TABELA 3.2-</b> Especificações técnicas dos dois aparatos experimentais.....	85
<b>TABELA 3.3-</b> Valores de velocidade prolongada para as duas espécies .....	91
<b>TABELA 3.4-</b> Levantamento de incertezas da vazão.....	100
<b>TABELA 3.5-</b> Valores medidos, média e desvio padrão do diâmetro da seção de teste do aparato DN 150.....	102
<b>TABELA 3.6-</b> Levantamento de incertezas do diâmetro da seção de teste do aparato de DN 150 .....	102
<b>TABELA 3.7-</b> Levantamento de incertezas do incremento da velocidade ( $\Delta U$ ).....	104
<b>TABELA 3.8 -</b> Cenários de Escadas do tipo slot vertical calculados.....	107
<b>TABELA 3.9-</b> Valores encontrados pela simulação numérica.....	109
<b>TABELA 4.1-</b> Regressão linear do Oxigênio Dissolvido x Velocidade Crítica .....	113
<b>TABELA 4.2-</b> Regressão linear de ln(Velocidade crítica) x Fator de condição p/ o mandi ..	118
<b>TABELA 4.3-</b> Regressão linear de ln (Velocidade crítica) x Fator de condição p/ o piau ....	119
<b>TABELA 4.4-</b> Regressão linear de ln (Velocidade crítica) x Fator de condição p/ a curimba .....	119
<b>TABELA 4.5-</b> Regressão linear de ln (Velocidade crítica) x Temperatura para o mandi.....	120
<b>TABELA 4.6-</b> Regressão linear de ln (Velocidade crítica) x Temperatura para a curimba..	120
<b>TABELA 4.7-</b> Regressão linear de ln (Velocidade crítica) x Temperatura para o piau .....	121
<b>TABELA 4.8 -</b> Regressão linear de ln (Velocidade crítica) x Temperatura x ln (Comp. total) para o piau .....	121
<b>TABELA 4.9-</b> Regressão linear de ln (Velocidade crítica) x Temperatura x ln (Comp. padrão) para o piau .....	122

<b>TABELA 4.10-</b> Regressão múltipla da velocidade de explosão (m/s), comprimento total e duração da explosão para o piau.....	137
<b>TABELA 4.11-</b> Regressão múltipla da velocidade de explosão (comp/s), comprimento total e duração da explosão para o piau.....	137
<b>TABELA 4.12-</b> Regressão múltipla da velocidade de explosão (m/s), comprimento total e duração da explosão para a curimba.....	140
<b>TABELA 4.13-</b> Regressão múltipla da velocidade de explosão (comp/s), comprimento total e duração da explosão para a curimba.....	140
<b>TABELA 4.14-</b> Comprimentos padrão e larguras máximas de três espécies de peixes.....	144
<b>TABELA 4.15-</b> Regressão múltipla da velocidade máxima, abertura do slot e inclinação....	151
<b>TABELA 4.16-</b> Regressão múltipla do volume da escada, abertura do slot e inclinação .....	152
<b>TABELA 5.1-</b> Aspectos experimentais e estatísticos de curvas de velocidade crítica conhecidas .....	159
<b>TABELA 5.2-</b> Influência da temperatura na velocidade crítica de cinco espécies de peixe..	160
<b>TABELA 5.3-</b> Velocidades (m/s) obtidas pelos diferentes métodos.....	164
<b>TABELA 5.4-</b> Comprimentos padrão e larguras máximas de três espécies de peixes.....	165
<b>TABELA 5.5 -</b> Velocidades máximas e volumes de concreto em escadas do tipo slot vertical com diferentes aberturas e 6% de inclinação.....	166
<b>TABELA 5.6-</b> Volume de concreto em função da velocidade e da inclinação .....	167

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Introdução

Desde as mais remotas civilizações, os cursos d'água têm sofrido os efeitos da ação antrópica, direta ou indiretamente, como por exemplo através da exploração de água subterrâneas. Com o passar do tempo, as intervenções no escoamento dos rios começaram a ser maiores, modificando a sua dinâmica e até sua fauna associada.

Interrupções como as provocadas pelas barragens causam enormes danos à biota local, afetando diretamente as espécies migradoras, que necessitam deslocar ao longo do rio em alguma fase de seu ciclo de vida.

Além de barragens, a construção de qualquer obra hidráulica que altere as características do escoamento de um curso d'água, pode produzir danos à ictiofauna migradora, por dificultar ou impedir o seu deslocamento. Um exemplo é o que ocorre em Lagoa Santa, Minas Gerais, cuja comunicação da lagoa Central com o córrego Bebedouro foi alterada com a colocação de bueiros (Pompeu e Alves, 2003).

A ação antrópica também não se limita a grandes empreendimentos. A alteração do leito, como a colocação de áreas concretadas e o desvio de rios em tubulações, pela própria população para abastecimento e lazer, podem causar mudanças na dinâmica dos cursos d'água (FIG. 1.1). Para solucionar esse problema ambiental, foram desenvolvidas estruturas que permitem ao peixe a transposição desses obstáculos. Conhecidas como mecanismos de transposição de peixes (MTP), tais estruturas passaram a ser amplamente utilizadas em todo do mundo.

Os dispositivos que permitem a passagem do peixe para montante receberam o nome de MTP para montante enquanto os outros dispositivos se denominam MTP para jusante, pois propiciam aos peixes na fase adulta e suas formas jovens descer o curso d'água.



FIGURA 1.1- Alterações no afluente do rio Cipó na Serra do Cipó (Minas Gerais)

As variações nos desníveis a serem transpostos e a disponibilidade de espaço para construção desses mecanismos levaram ao desenvolvimento de vários tipos de MTP para montante. Esses diversos dispositivos são classificados em escadas, canais para transposição, eclusas ou elevadores de peixes.

De todas essas estruturas talvez as mais populares sejam as escadas para peixes. Essas são constituídas de canais com obstruções internas para redução da velocidade da água. Por se tratar de um mecanismo cujo processo de transposição se baseia na locomoção do peixe, é de extrema importância que a velocidade do escoamento na estrutura não ultrapasse um valor limite suportado pelo animal. Assim, o controle de velocidade é obtido por obstruções, que conseguem manter essa velocidade através de um processo de dissipação da energia do escoamento. Essas obstruções também permitem um aumento da inclinação dos canais, diminuindo conseqüentemente suas extensões. No entanto, a partir de um determinado desnível, as escadas passam a não ser economicamente viáveis, à medida que, para manterem uma velocidade admissível e, portanto, uma inclinação admissível, seus comprimentos devem ser demasiadamente longos. Assim, esse tipo de MTP é freqüentemente empregado em barragens com alturas inferiores a 25m, sendo que a inclinação da mesma deve estar entre 10 e 15%, para escadas com tanques, e até 20% para escadas do tipo Denil (Larinier,2002).



Essa divisão das escadas ocorre em decorrência da infinidade de forma que as mesmas podem assumir, sendo que o emprego de cada uma deve levar em conta as características das espécies e a variedade das mesmas. Uma das escadas que vem sendo empregadas no Brasil é a do tipo ranhura vertical (ou *slot*) e consiste em canais nos quais os diferentes tipos de anteparos criam tanques, aonde é possível o peixe descansar. A FIG. 1.2 mostra a escada de AHE Aimorés, cujo tipo é chamado ranhura vertical.

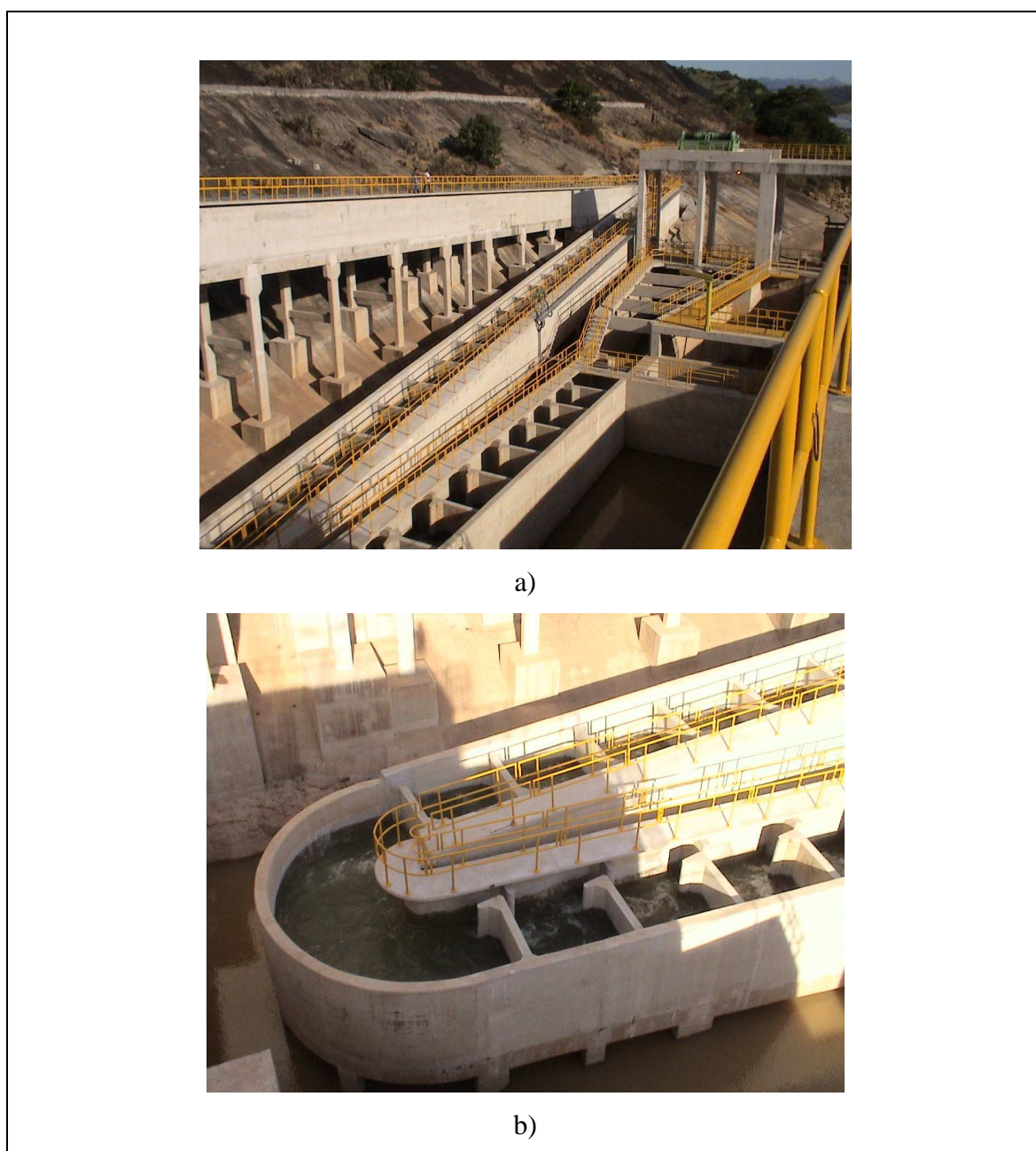


FIGURA 1.2 – a) Escada do tipo ranhura vertical na AHE Aimorés

b) Detalhe das piscinas da escada da AHE Aimorés

FOTO: POMPEU

Quando as escadas passam a não ser alternativas viáveis, em termos de capacidade de transposição ou de custo de instalação da estrutura, normalmente se empregam as eclusas para peixes, que são indicadas para alturas de barramento entre 20 e 60m (Clay,1995). O funcionamento dessas estruturas é bastante parecido com o das eclusas para navios. Tais mecanismos consistem basicamente em câmaras que são fechadas após a entrada do peixe, onde aumenta-se o nível da água através de uma canalização de adução interna. Para a saída do peixe da câmara, são criadas correntes descendentes dentro da mesma que posteriormente são quebradas com a abertura da comporta de montante (Travade e Larinier, 2002). A FIG 1.3 retrata um esquema de uma eclusa.

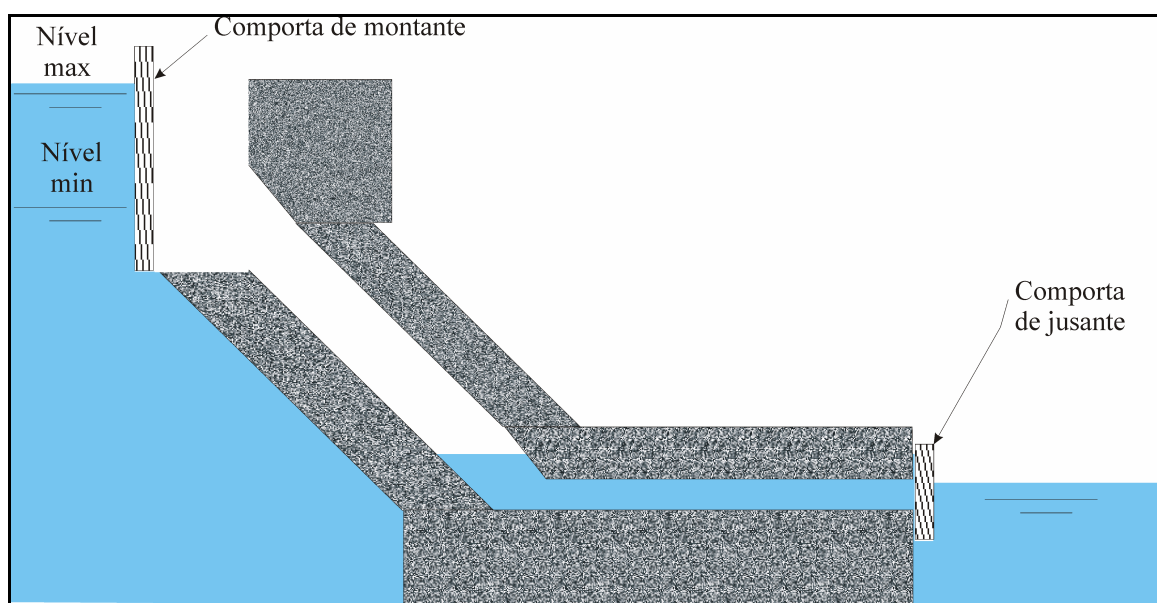


FIGURA 1.3- Esquema de uma eclusa para peixes

FONTE: Adaptado de TRAVADE e LARINIER, 2002

A escolha do MTP do tipo eclusa depende entre outros fatores, como a disponibilidade de espaço no layout do barramento, o que na maioria das vezes não ocorre no Brasil visto que os projetos de MTP são deixados para depois da construção da usina.

A partir da altura de 60m, o custo da instalação dos elevadores de peixes passa a ser menor do que os gastos iniciais dos outros MTP, apesar do seu custo de manutenção e operação ser relativamente elevado (Clay,1995). Trata-se de um sistema no qual o peixe é capturado em uma câmara, apropriadamente dimensionada e localizada na base da barragem, sendo a mesma posteriormente elevada, procedendo a transferência dos peixes para a região a montante da construção (FIG. 1.4).

É possível encontrar ainda uma variante desse MTP conhecida como elevador tipo caminhão tanque. Nesse sistema, o peixe, após ser capturado, é conduzido a um tanque de um caminhão apropriado que fará o deslocamento de jusante para montante da barragem (Clay, 1995).

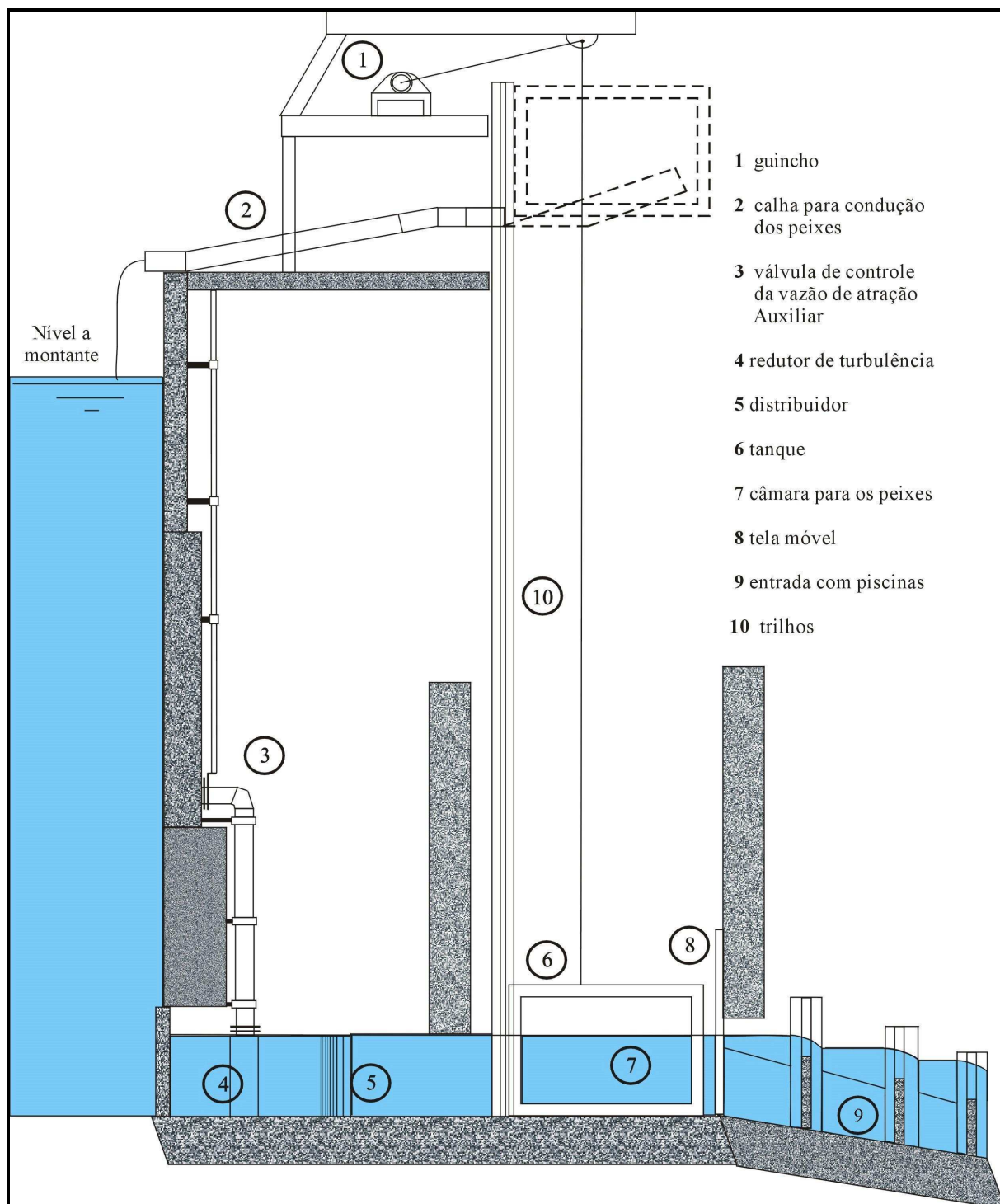


FIGURA 1.4- Esquema de um elevador para peixes

FONTE: Adaptado de TRAVADE e LARINIER, 2002

Uma alternativa que recentemente vêm sendo implantada em países como Alemanha (Gleber, 1991) e Japão são os chamados canais de transposição. Como notado por Parasiewitz *et al.* (1998), estes canais têm a função de restaurar, até certo grau, os habitat hidráulicos perdidos devido a uma obstrução do rio. Normalmente são utilizados quando existe a possibilidade de aproveitamento de um leito natural de um pequeno rio logo a jusante da barragem, que pode ser conectado ao reservatório. No caso da Hidrelétrica de Itaipu, utilizou-se um pequeno rio localizado em paralelo ao rio principal (no caso rio Paraná), tendo sido conectado ao reservatório por meio de canais artificiais, escadas para peixes e lagos (Fernandez, Agostinho e Bini, 2004).

Tendo em vista todas estas opções de MTP, a escolha do melhor dispositivo deve levar em consideração as características da barragem. No entanto, é de fundamental importância que sejam observadas as características das populações de peixes presentes no local, para que se obtenha um MTP eficiente.

Alguns estados como Minas Gerais e São Paulo apresentam leis recentemente promulgadas que obrigam a construção dos chamados Mecanismos de Transposição de Peixes, MTP, nos barramentos que impliquem no impedimento da migração dos peixes (Minas Gerais, 1997 e São Paulo, 1997).

Esta obrigação legal impulsionou a construção de MTP que foram baseados em projetos já executados nos países desenvolvidos como Estados Unidos, Canadá e França. No entanto, tais projetos, foram construídos para atender a ictiofauna de clima temperado cuja diversidade e comportamento migratório/natatório são completamente diferentes das observadas em peixes tropicais.

Assim, nos dispositivos do tipo escada, onde os peixes são agentes ativos (pois é através da sua capacidade natatória que o desnível é vencido), a eficiência da transposição pode está sendo comprometida. Isso devido à suposição, talvez equivocada, de que comportamento migratório/natatório dos peixes de clima temperado é idêntico ao dos tropicais.

Além dessa possível diferença, a complexidade e diversidade da fauna tropical deve ser levada em consideração na escolha do MTP a ser construído. Mesmo nos países de clima

temperado é comum encontrar em barragens mais de um tipo de escada, como por exemplo, uma para salmão e outra para enguia.

Na América Latina, muitos empreendimentos têm optado pela construção de mecanismos tipo elevadores, pois estes sistemas permitem a transposição de todas as espécies de peixes presentes no local (Clay, 1995). No entanto, apesar dessa recente preocupação com a biodiversidade, muito pouco se sabe a respeito do comportamento migratório e das habilidades dos peixes latino-americanos, bem como da sua respectiva biomassa. Segundo Quirós (1989), com essa falta de conhecimento é praticamente impossível estabelecer diretrizes para construção de um MTP que seja eficiente.

Dessa forma, o presente trabalho de doutorado tem como objetivo continuar os primeiros estudos sobre a capacidade natatória dos peixes neotropicais, analisando a influência dos dados obtidos nos parâmetros construtivos dos MTP, com enfoque nas escadas do tipo ranhura vertical. Pretende-se assim, além de fornecer sobre a capacidade natatória de algumas de nossas espécies, revisar as metodologias de dimensionamento dos MTP, buscando detalhar melhor a interação entre as capacidades da ictiofauna e as características hidráulicas dos escoamentos internos à esses dispositivos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo levantar as curvas de capacidade natatória de algumas espécies de peixes sul-americanos, pertencentes a gêneros representativos de nossa fauna migradora, e aplicá-las tanto na verificação dos critérios de dimensionamento de uma escada do tipo slot vertical como na avaliação de uma escada já construída.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Assim, este projeto tem como objetivos específicos:

- Identificar as espécies a serem estudadas levando em consideração seu comportamento migratório, sua disponibilidade nos rios em Minas Gerais e sua importância na atividade pesqueira.

- Levantar as curvas das velocidades de explosão e prolongada das espécies identificadas anteriormente, através de testes experimentais em laboratório;
- Através dos critérios de dimensionamento já existentes na literatura e das curvas de velocidades encontradas experimentalmente, verificar as possíveis alterações nos parâmetros hidráulicos (inclinação e velocidade do escoamento) das escadas do tipo ranhura vertical;
- Quantificar a alterações nos volumes de concreto das escadas para peixes em função da adoção das modificações verificadas anteriormente;
- Identificar os pontos de passagens preferenciais através da comparação dos perfis de velocidade dentro de uma escada do tipo ranhura-vertical com as curvas de velocidades levantadas para espécies estudadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Peixes e suas características de locomoção

As exigências interdisciplinares de qualquer estudo sobre mecanismos de transposição tornam necessária a compreensão de aspectos bastante diferenciados, que vão desde a hidráulica básica à sistemática dos peixes. Aplicar o estudo da capacidade natatória no dimensionamento desses dispositivos, por sua vez, é como estar na região limítrofe de duas áreas, sem conhecer ao certo como uma interage com a outra e vice-versa.

Em todo mundo, biólogos e engenheiros tentam descobrir as possíveis relações entre as características do escoamento (velocidade e turbulência entre outras) e as velocidades desenvolvidas pelos peixes.

Dessa forma, o presente capítulo tem como objetivo mostrar a base teórica utilizada neste estudo, fornecendo também um histórico e o atual estágio das pesquisas nesta área.

#### 2.1.1. Locomoção dos peixes

Os peixes podem desenvolver vários tipos de movimentos para se deslocarem e esses são divididos em natatórios e não natatórios (Lindsey, 1978). O que diferencia esses dois grupos é a realização ou não da livre locomoção, sem contato com o chão e para frente. Se isso ocorre, tem-se que o movimento é natatório.

Apesar da maior parte do tempo o peixe realizar o deslocamento natatório, o mesmo necessita de outras manobras essenciais para sua alimentação, reprodução, fuga de presas ou perseguição no caso dos predadores (Lindsey, 1978). Todos esses movimentos são agrupados na locomoção não natatória, que apesar da sua importância, não é estudada de forma tão exaustiva como o deslocamento natatório.

A propulsão a jato, apesar de possibilitar a propulsão livre do peixe, é considerada um movimento não-natatório, uma vez que o animal utiliza-se apenas das brânquias para realizar este deslocamento. Através da exalação de água presente nesses órgãos, alguns peixes são capazes de criar fluxos de massa de água que auxiliam na propulsão (Lindsey, 1978). Esse movimento pode ser observado no tubarão *Rhincodon typus* (Lindsey, 1978). No entanto o

pequeno volume de água existente nas brânquias da maioria dos peixes, torna a propulsão, criada pelas mesmas, praticamente insignificante em relação à produzida pelos movimentos natatórios (Bainbridge, 1961). Apesar disso, o peixe, quando parado, deve realizar movimentos compensatórios que o permite ficar estacionado, já que uma pequena propulsão é criada pelas brânquias. Esse movimento é feito pelas nadadeiras peitorais, dorsal ou pelo pedúnculo caudal e o mesmo cria uma propulsão “contrária” à produzida pelas brânquias (Lindsey, 1978).

A exalação de água das brânquias também pode ter um outro efeito na locomoção no que diz respeito à separação da camada limite em torno do peixe. Segundo Lighthill (1969), Aleev e Ovcharov (1973), o fluxo proveniente das brânquias pode atrasar a separação da camada limite.

O segundo tipo de locomoção pertencente ao grupo dos movimentos não natatórios é a locomoção terrestre. Alguns peixes são capazes de se deslocar em terrenos úmidos ou secos como os peixes da família Clariidae existentes na África (no Brasil alguns representantes dessa família foram introduzidos e recebem o nome de bagres africanos). A FIG 2.1 mostra uma seqüência de fotos do deslocamento desses peixes. Sua movimentação assemelha-se a de uma cobra e os mesmos possuem adaptações que permitem a retirada do oxigênio através do ar com uso de mecanismos acessórios (Lindsey, 1978). Durante sua movimentação, esses peixes alongam sua lateral e suas nadadeiras peitorais e pélvica são rigidamente dilatadas.

No entanto nada se compara à locomoção terrestres dos peixes anfíbios (FIG 2.2). Suas nadadeiras peitorais consistem em 2 partes funcionais que podem ser dobradas para apoiar no chão e se assemelham ao braço superior de um tetrápode (Lindsey, 1978).

Outra forma de locomoção terrestre é a adesão criada pela boca dos bagres do gênero *Astroblepus*. Semelhantemente à boca dos cascudos, peixes cobertos por placas ósseas, esses bagres possuem ventosas as quais auxiliam na subida de quedas d'água (Lindsey, 1978). As FIG. 2.3 a e b mostram um representante da espécie *Astroblepus rosei*, encontrado no interior de cavernas.



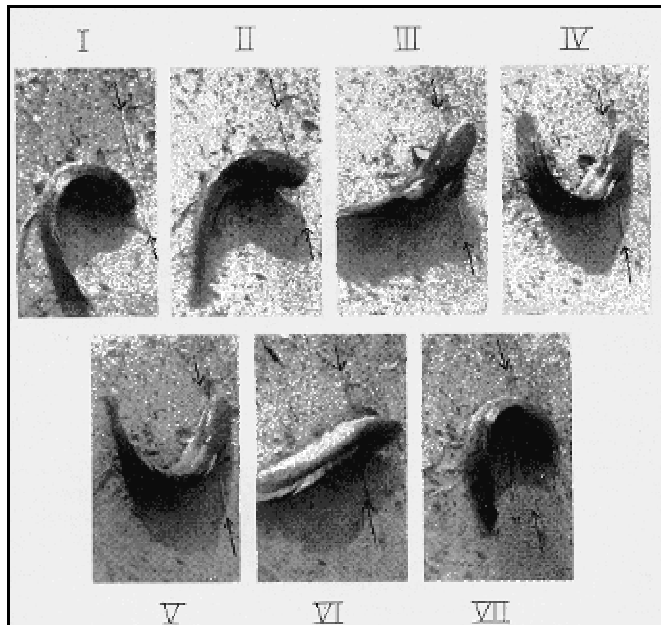


FIGURA 2.1- Indivíduo da família Clariidae realizando locomoção terrestre

FONTE: NRM Fish Collection, 2005



FIGURA 2.2 a) *Periophthalmus* sp. FONTE: RYAN PHOTOGRAPHIC, 2005

b) *Periophthalmus modestus* FOTO: MITCUAKI TAKATA (Uri Sakura, 2005)

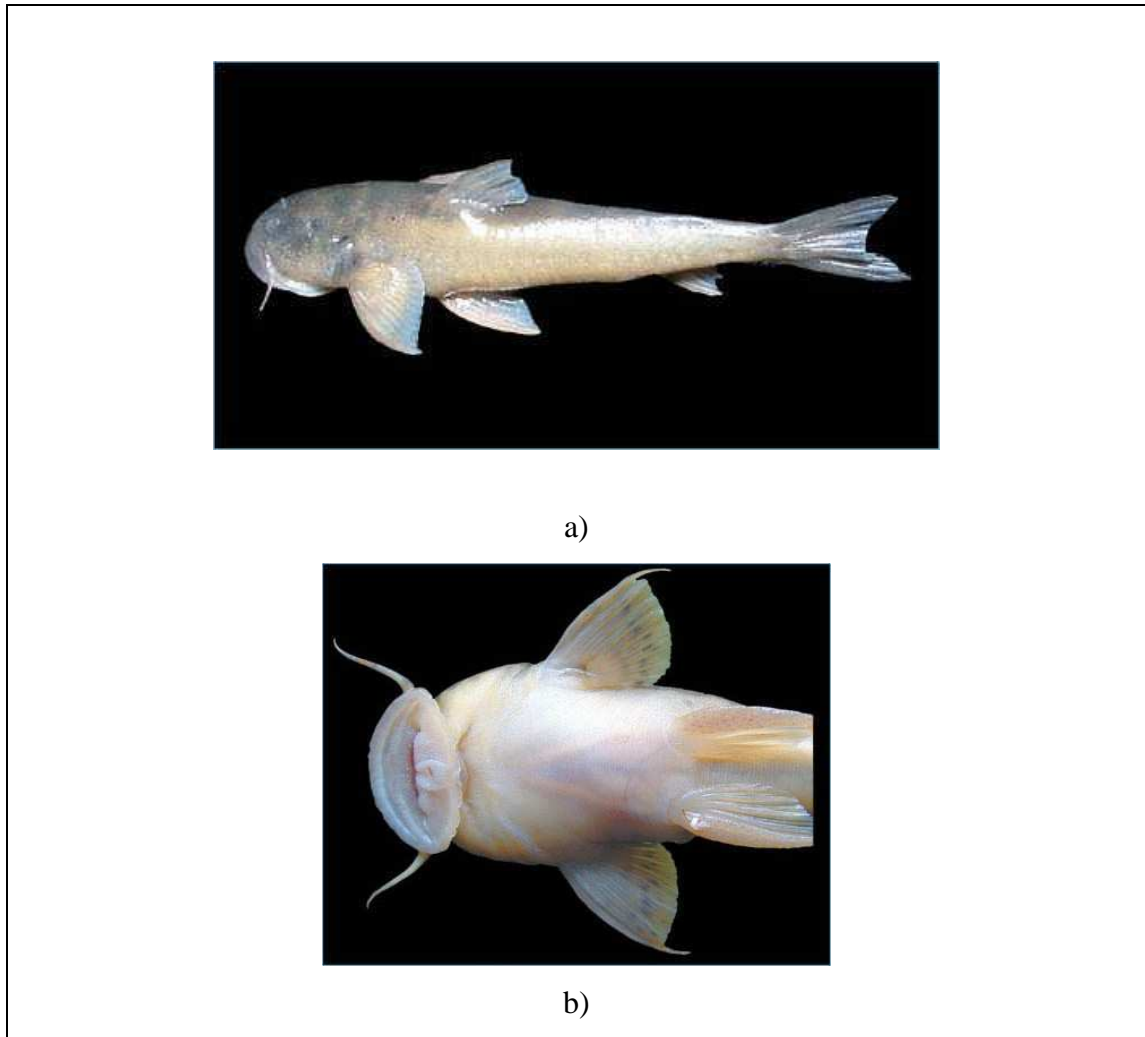


FIGURA 2.3- a) *Astroblepus rosei*

b) Boca do *Astroblepus rosei*

FONTE: THE FIELD MUSEUM, 2005

Outro movimento não natatório, utilizado por alguns peixes, é a locomoção submersa próxima ao chão. Para isso o animal pode fazer uso das nadadeiras peitorais para “caminhar” ou se fixar no substrato ou em plantas, muitas vezes fonte de alimentos para esses animais. Outra razão para esse comportamento próximo ao chão é necessidade que alguns peixes mais pesados têm de descansar ou apoiar no substrato (Lindsey, 1978). A FIG. 2.4 mostra uma pirambóia (*Lepidosiren paradoxa*), peixe pulmonado existente nas bacias Amazônica (AGBAYANI, 2005), que utiliza suas nadadeiras peitorais e pélvica como suporte quando descansa nos fundos dos rios (Lindsey, 1978).

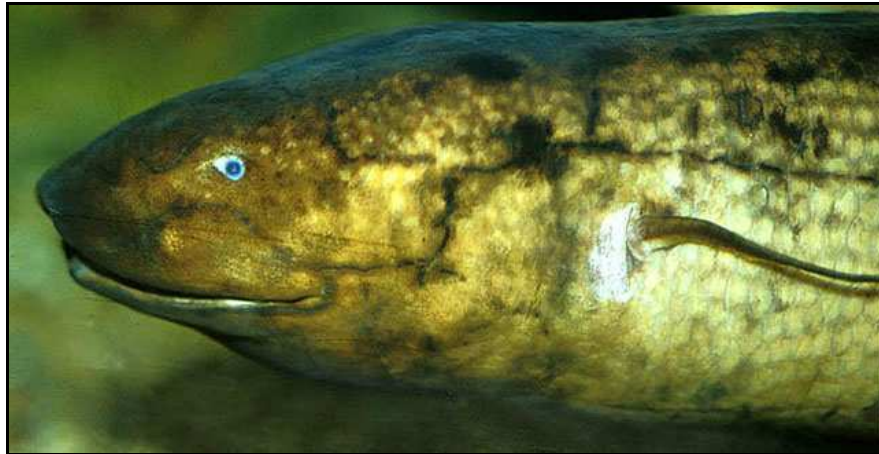


FIGURA 2.4 *Lepidosiren paradoxa* (pirambóia)

FONTE: JENSEN

Alguns peixes também utilizam a locomoção próxima à pedras, como os cascudos, que através da sua ventosa bucal fixa-se para se alimentar de algas e detritos (Cemig-Cetec, 2000). A FIG. 2.5 mostra o cascudo *Pogonopoma wertheimeri* encontrado na bacia do rio Mucuri.



FIGURA 2.5 - *Pogonopoma wertheimeri* (cascudo preto do rio Mucuri)

FOTO: POMPEU

Existem alguns peixes ainda, além de desenvolverem movimentos próximos ao chão, são capazes de abrir buracos no substrato e se locomoverem por pequenos “túneis”. É o caso da enguia, peixes representantes da família Ophichthidae e de grande importância nos estudos de migração nos países de clima temperado (Lindsey, 1978).

O último grupo de movimentos não natatórios abrange os saltos e vôos, ou seja, deslocamentos pelo ar. Esse tipo de deslocamento pode ser utilizado para a realização de

alimentação e migração, entre outras. Um exemplo do uso dessa locomoção é observado durante o fenômeno da piracema. Nos rios, quando é chegada a época da reprodução, os peixes sobem os cursos d'água para desova. Durante esse trajeto, algumas espécies saltam para vencer determinadas barreiras de velocidade. É o caso do dourado, *Salminus brasiliensis*.

No entanto, nenhum dos deslocamentos citados acima se equipara à capacidade natatória quanto à eficiência em propulsão. Esse movimento é específico dos peixes (e de alguns mamíferos) e empregado na maior parte do tempo.

Para nadar o peixe conta com um sistema propulsor que se divide basicamente em 2 elementos: os propulsores, que são as nadadeiras, e os músculos que orientam esses propulsores (Webb, 1993). Os primeiros são responsáveis pela transferência do movimento do peixe para água, enquanto o último basicamente tem a função de direcionar os propulsores.

No entanto, apesar de possuir várias nadadeiras, o peixe não utiliza todas na locomoção. O simples fato de serem bastante variadas faz com que algumas sejam mais usadas do que outras (Webb, 1993). Acreditava-se até que determinadas nadadeiras não desempenhem nenhuma função na locomoção como as adiposas, que em alguns procedimentos de marcação de peixe são até cortadas. No entanto, o que acontece é uma falta de conhecimento da real importância de cada um desses propulsores no deslocamento dos peixes. Trabalhos recentes, como o de Reicmchen e Temple (2004), indicam que a nadadeira adiposa pode ter a função de controlar os vórtices formados durante a natação do peixe ou de ser um sensor de indicação de escoamento turbulento. A FIG. 2.6 mostra a localização das nadadeiras presentes nos peixes em geral.

Assim, as nadadeiras são parte importante de um sistema propulsor que propicia a realização de movimentos natatórios. Esses por sua vez, como qualquer tipo de locomoção, são compostos pelos chamados padrões de locomoção (*gait*), cuja definição está relacionada com as velocidades desenvolvidas e com as partes do sistema propulsor utilizadas no deslocamento. Nos animais terrestres a definição desses padrões é mais visualizável e popularmente definida. O andar e o galope de um cavalo, por exemplo, são claramente padrões diferentes de locomoção. Dessa forma em 1989, Alexander generalizou o conceito de padrões de locomoção definindo como, um padrão caracterizado por um intervalo de

velocidade e determinado por uma ou mais mudanças descontínuas para outro padrão de deslocamento.

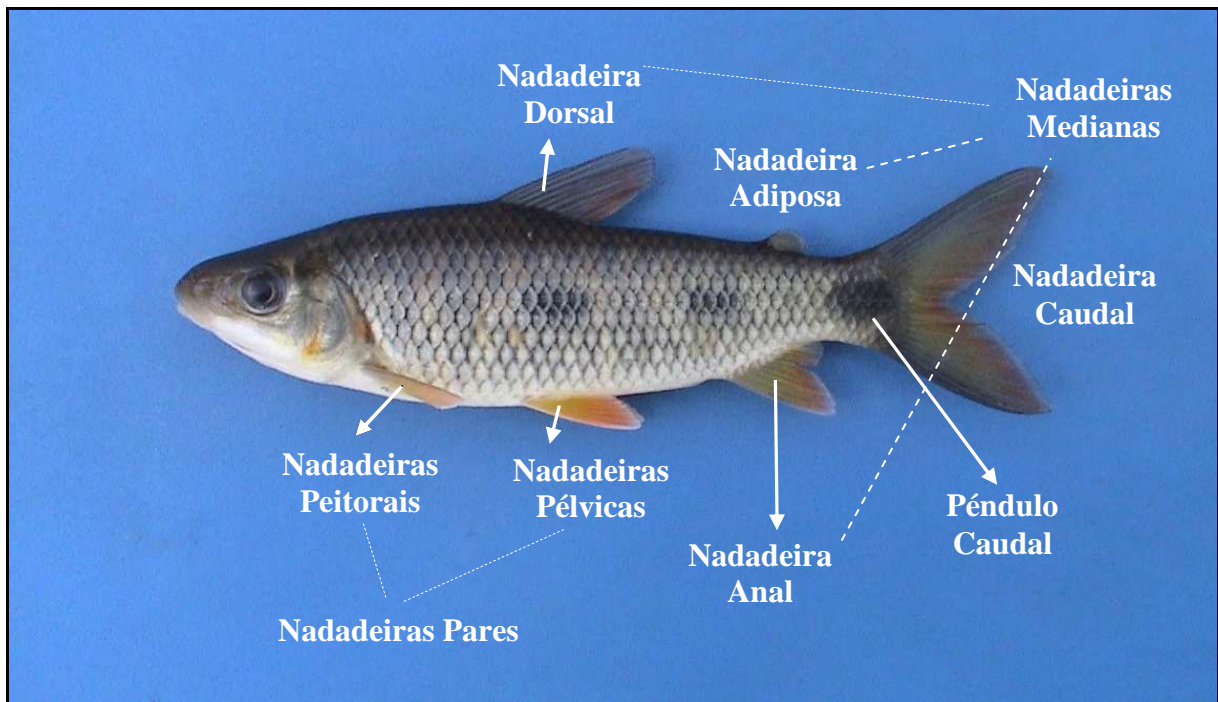


FIGURA 2.6- Nadadeiras de *Leporinus obtusidens*

FOTO: POMPEU

A natação dos peixes apresenta uma surpreendente variedade de padrões, muito superior às apresentadas pelos animais terrestres e voadores (Webb, 1994). Isso se deve à relação entre a potência requerida para propulsão e velocidade desenvolvida. Para peixes, a potência necessária para produzir uma certa velocidade é igual a essa última elevada à 2,5-2,8 enquanto para os animais terrestre essa relação é diretamente proporcional. Dessa forma, essa potência requerida para natação aumenta muito rapidamente com o aumento da velocidade. Conseqüentemente, para um dado padrão de locomoção, o peixe só consegue fornecer eficientemente energia para um pequeno intervalo de velocidades. Isso explica a quantidade de padrões apresentados por esses animais em relação aos terrestres e voadores (Webb, 1994).

Como explicando anteriormente, as velocidades desenvolvidas e os sistemas propulsores utilizados na locomoção determinam um padrão de deslocamento. Assim, Webb (1994) sistematizou esses padrões através da FIG. 2.7, indicando as possíveis combinações entre nadadeiras, músculos e velocidades que originam um certo padrão de deslocamento.

Observando a FIG. 2.7 é possível perceber que a variedade de propulsores ou nadadeiras apresentadas pelos peixes é um outro fator que justifica a quantidade de padrões de locomoção da natação (Webb, 1994). Evolutivamente a explicação para essa riqueza de propulsores está no fato de que a densidade da água propicia um suporte do corpo dos peixes. Como a manutenção em equilíbrio vertical não era o problema principal, os animais aquáticos puderam desenvolver numerosos sistemas propulsores, que funcionam de forma independente ou conjunta (Webb, 1994).

Portanto, à medida que os estudos de capacidade natatória iam se aprofundando, fez necessária uma classificação da natação quanto ao uso das nadadeiras. Breder em 1926 foi o primeiro a propor uma divisão. A nomenclatura de sua classificação baseia-se na escolha de uma família como principal representante de um tipo de locomoção, sendo o nome da mesma acrescido do sufixo “forme” (Lindsey, 1978). Dessa forma, tomando-se como exemplo os movimentos ondulatórios realizados com a nadadeira caudal e com o tronco, tinha-se como principal representante as enguias, cuja família é Anguillidae. Assim o grupo ficaria anguilliformes. No entanto, muitos pesquisadores criticam esta classificação afirmando ser muito simplificada e pouco definida, na medida que não reconhece as similaridades dos mecanismos cinemáticos e físicos pelos quais o impulso é gerado (Webb e Blake, 1985; Sfakiotakis, Lane e Davies, 1999) além de não possuir relação taxonômica. Dentre as falhas da nomenclatura estão a falta de nome para alguns grupos com pequenas diferenças no tipo de propulsão (como por exemplo o grupo dos *Mola*) e a abrangência de um mesmo nome para sistemas de propulsão diferentes (labriformes) (Webb, 1993). Apesar das controvérsias, a nomenclatura de Breder foi a base para as classificações que foram feitas posteriormente por Bainbridge (1961), Marshall (1971) e Webb (1975).

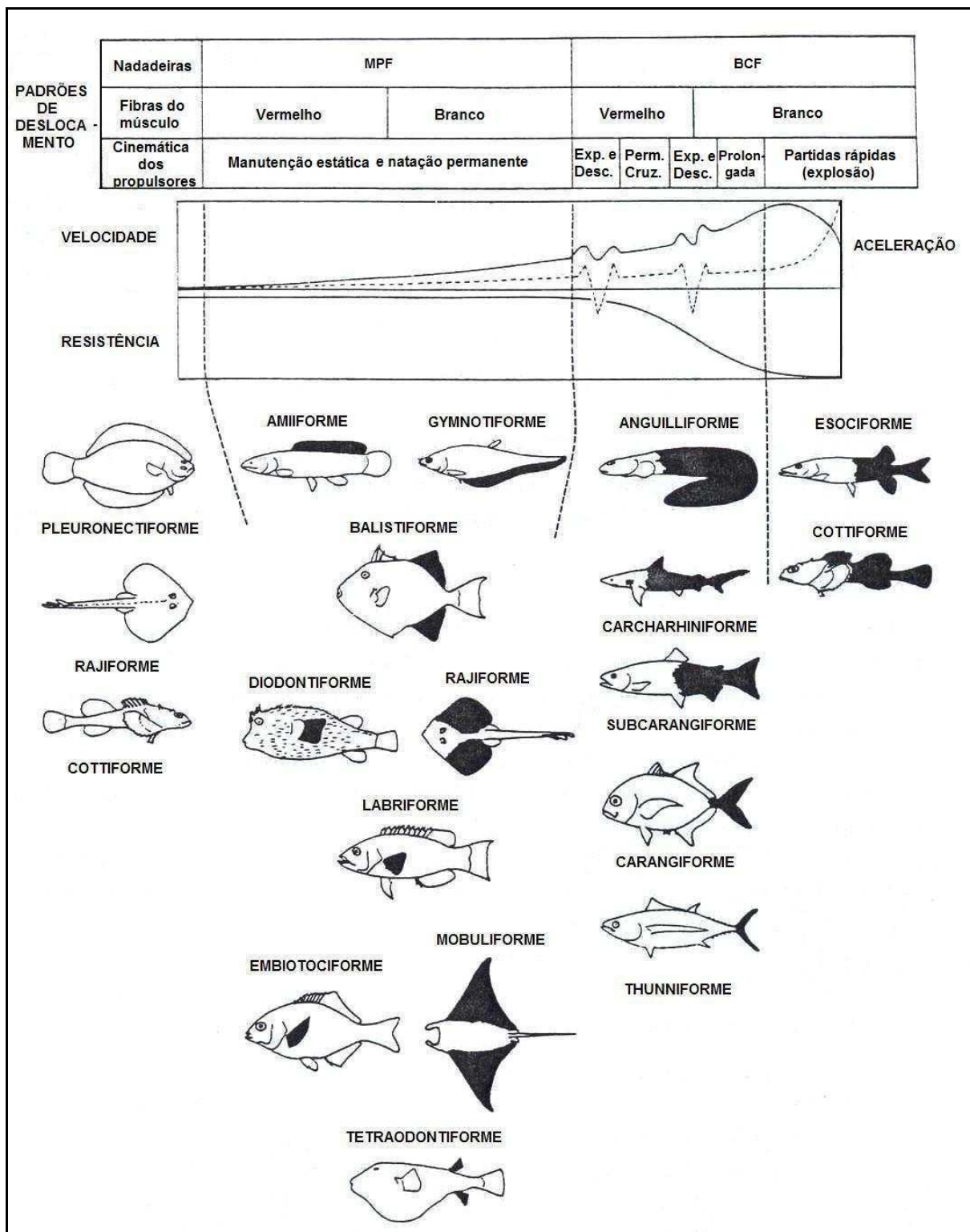


FIGURA 2.7- Descrição dos padrões de locomoção (*gait*) da natação com respectivos propulsores, velocidades e músculos utilizados.

FONTE: WEBB, 1994. p.

A classificação mais utilizada atualmente é uma mistura das citadas acima e inicia-se com o agrupamento da natação em dois grupos: a que utiliza principalmente as nadadeiras medianas e pares (cuja sigla em inglês é *MPF propulsion – median and paired fin propulsion*) e a que utiliza mais o corpo e a nadadeira caudal (*BCF propulsion- body and caudal fin propulsion*) (Webb,1993). Dentro de cada um desses grupos existe uma outra subdivisão dos peixes quanto ao uso específico de uma determinada nadadeira e quanto ao tipo de movimento realizado por ela: o ondulatório ou oscilatório. Na ondulação a nadadeira propaga as ondas da água ao longo do seu comprimento enquanto, na oscilação, a mesma realiza um movimento parecido com um pêndulo sem ocorrer a formação de ondas (Sfakiotakis, Lane e Davies, 1999).

A maioria dos peixes realiza movimentos do tipo BCF, estando estes divididos nos grupos dos anguilliformes, subcarangiforme, carangiforme, thunniforme, ostraciiforme. Os anguilliformes e ostraciiformes são os grupos mais extremos pois o primeiro só realiza movimentos ondulatórios enquanto que o segundo só realiza movimentos oscilatórios (Lindsey, 1978). Os grupos intermediários utilizam os dois tipos de movimentos (ondulatório e oscilatório), podendo um ser mais usado do que o outro. A principal diferença desses grupos está na flexibilidade lateral do peixe e, conseqüentemente, no comprimento da onda que passa pelo corpo do mesmo.

É importante ser ressaltado que todas as classificações dizem respeito a tipos padrões discretizados dentro de um limite contínuo dos modos de natação (Webb, 1975). Além disso, poucos são as espécies de peixes que apresentam o mesmo modo de natação durante toda sua vida. A maioria das larvas dos peixes apresenta o modo de natação anguilliforme, desenvolvendo apenas nas fases posteriores o modo de natação característico de sua espécie.

A FIG. 2.8 ilustra de forma simplificada a classificação atual da natação quanto às nadadeiras utilizadas.

Outro elemento formador do sistema de locomoção e fator determinante dos tipos de padrões apresentados pelos peixes são os músculos. Compostos por fibras, esses últimos podem apresentar diferentes propriedades de acordo com as mesmas. Os dois tipos de fibras mais importantes para locomoção são: as fibras vermelhas, ou oxidativas lentas, e as fibras brancas,



ou glicolíticas rápidas (Bone,1975). Existe ainda um terceiro tipo de fibra, também usado pelo peixe, conhecida como fibras rosas ou oxidativas rápidas (Johnston, 1981).

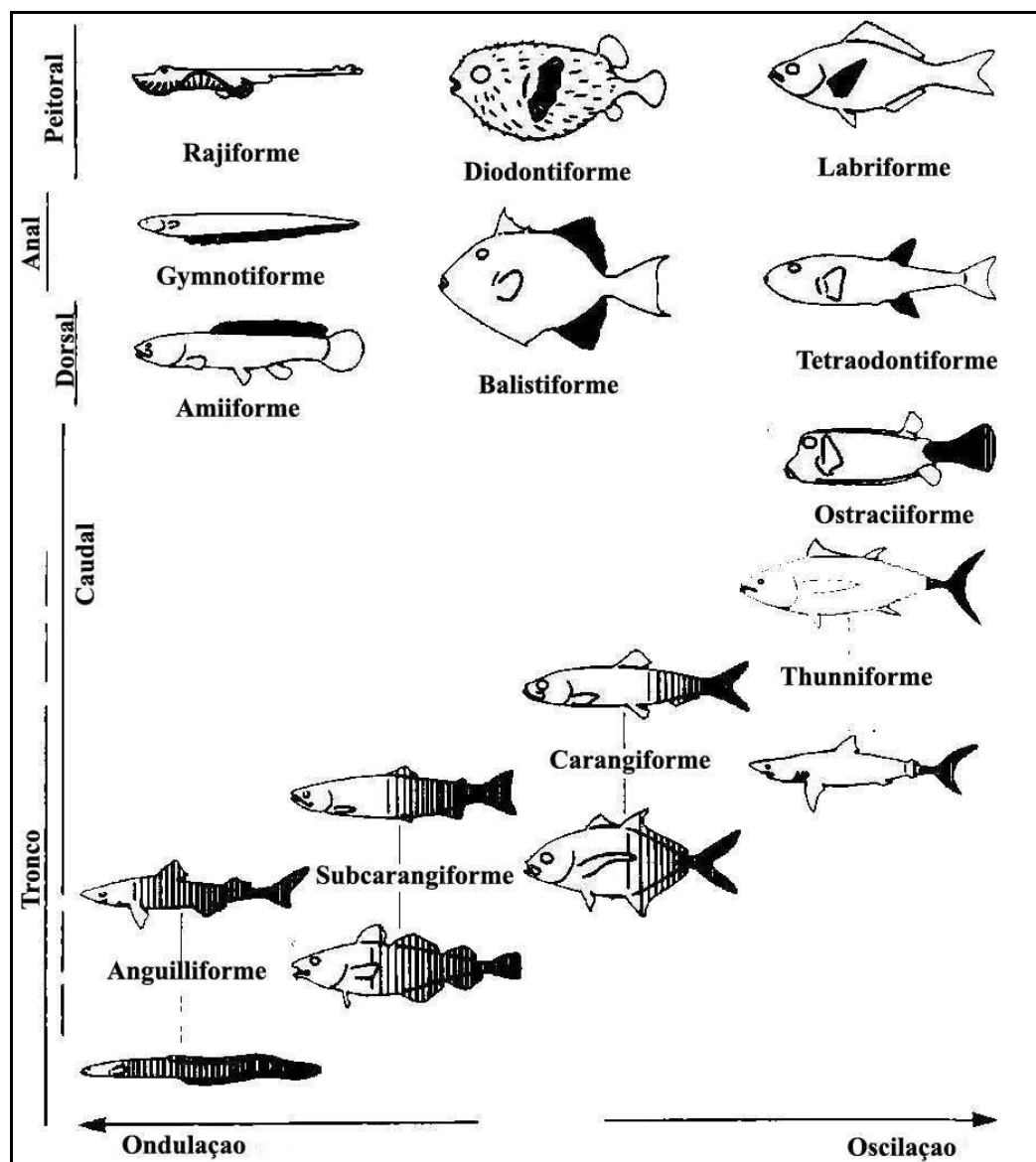


FIGURA 2.8- Classificação, quanto ao modo de propulsão, atualmente utilizada.

FONTE: LINDSEY, 1978. p. 9

A velocidade de contração é uma das principais diferenças dessas fibras, sendo também um determinante crítico da potência produzida pelo músculo (Webb,1993). As fibras vermelhas são mais lentas. Porém, teoricamente, não sofrem exaustão, uma vez que possuem uma rápida capacidade de recuperação devido ao seu metabolismo aeróbico. Já as fibras brancas são mais rápidas, mas sofrem exaustão em um curto período de tempo. Como seu metabolismo é

principalmente anaeróbio, são necessárias em média 24 horas para se recuperarem, removendo o ácido láctico produzido durante atividades de explosão (Videler, 1993).

Dessa forma, é possível perceber que o tipo de metabolismo para produção de energia é outra característica diferenciadora das fibras. Conseqüentemente, a presença de vasos sanguíneos também é, uma vez que o metabolismo aeróbio exige que as fibras vermelhas sejam bastante vascularizadas. O contrário ocorre com as fibras brancas. As fibras rosas apresentam características intermediárias às vermelhas e brancas (Webb,1993).

A proporção das fibras vermelhas e brancas nos músculos está relacionada ao modo de vida dos peixes (Boddeke et al., 1959), uma vez que o emprego das fibras depende das diversas atividades realizadas pelos mesmos. As fibras vermelhas são utilizadas em atividades rotineiras enquanto as fibras brancas estão ligadas às atividades de explosão, isto é às situações críticas de sobrevivência (Webb,1993).

Por fim, utilizando seu sistema propulsor, os peixes conseguem desenvolver várias velocidades e compor, com as mesmas, diferentes padrões de locomoção. Na realidade, segundo Webb (1993), mais do que simplesmente a velocidade, é a cinemática dos propulsores que condiciona esses padrões. Por exemplo, existe um único movimento cinemático onde o peixe alterna a natação de velocidades altas, no caso a chamada velocidade prolongada, com natação sem movimentos (como se o mesmo estivesse planando). É a combinação desse movimento cinemático com o uso de um determinado sistema propulsor que determina um padrão de deslocamento. Portanto, para Webb, o fator condicionante da mudança de padrão de deslocamento é a cinemática dos propulsores não a velocidade desenvolvida pelos peixes.

Apesar disso, antes mesmos de se conhecer essa cinemática natatória, muitas vezes complexa, os pesquisadores se concentraram no estudo das velocidades, criando uma classificação que considera algumas peculiaridades como a fadiga. Dessa forma, as principais velocidades desenvolvidas pelos peixes podem ser divididas em (Beamish, 1978):

- a) Sustentável, velocidade mantida por longos períodos (maiores que 200 min) sem resultar numa fadiga. Dentro desse grupo ainda existem duas subcategorias específicas de velocidades:

- Velocidade de cruzeiro, que representa a velocidade mais econômica do peixe, isto é, a velocidade cujo gasto de energia é muito pequeno comparado com a distância percorrida;
- Velocidade em cardumes, desenvolvida quando o cardume se encontra num arranjo regular. Os vórtices formados pela batida da cauda do peixe, na parte posterior do escoamento, anulam os vórtices desfavoráveis à propulsão do animal. Assim, alguns peixes aproveitam dessa diminuição do arrasto posicionando no arranjo indicado na FIG. 2.9.

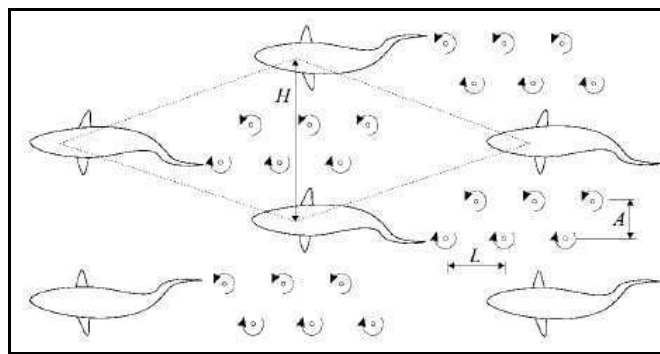


FIGURA 2.9-Arranjo regular de um cardume

FONTE: SFAKIOTAKIS, LANE e DAVIES, 1999. p. 243

- b) Prolongada, velocidade mantida por um período de tempo menor que a sustentável (de 20 seg. a 200 min), e que resulta em fadiga muscular devido ao acúmulo de ácido lático nos tecidos musculares. A produção desse ácido decorre da respiração anaeróbia, que é realizada na medida que a atividade física do músculo requer mais oxigênio do que o disponível. A velocidade prolongada é a velocidade mais medida em laboratório e sua principal subcategoria é:
- Velocidade crítica, que foi primeiramente definida e empregada por Brett (1964), e corresponde à velocidade máxima ( $U_{max}$ ) que um peixe poderia manter num escoamento cuja velocidade é aumentada ( $\Delta U$ ) num período de tempo predeterminado ( $t_i$ ). Com a fadiga do peixe muitas vezes não ocorre no final desse período, uma interpolação é feita com o tempo ( $t_f$ ) que o mesmo nadou dentro intervalo. Assim, a velocidade crítica é dada pela EQ. 1:

$$V_{crit} = U_{max} + \frac{t_f}{t_i} \times \Delta U \quad \text{EQ. 2.1}$$

- c) De explosão, correspondente às maiores velocidades desenvolvidas pelos peixes e asseguradas por curto intervalo de tempo (menor do que 20 seg.). Resulta em grande fadiga do animal e seu emprego está relacionado a casos extremos como caça a presas e fuga de predadores. A capacidade de explosão é, para muitas espécies, o pré-requisito para sobreviver. O sucesso de uma migração para desova de muitas espécies, que devem transpor trechos rápidos dos rios, depende da capacidade de explosão (Beamish, 1978).

As velocidades de natação são importantes indicadores do comportamento e da atividade dos peixes. Dessa forma, o levantamento das mesmas possibilita o conhecimento de muitos aspectos comportamentais e até o manejo das espécies estudadas. Um exemplo disso é aplicação da determinação das velocidades natatórias para o dimensionamento de mecanismos de transposição.

Quanto à cinemática dos propulsores, apenas estudos recentes, da década de 1980, é que começaram a relatar seu uso na obtenção de uma melhor eficiência na natação. Assim, segundo Weihs e Webb (1983), a natação dos peixes foi dividida em dois grupos (levando a cinemática):

- a) Natação permanente (periódica ou sustentável), caracterizada pela repetição cíclica dos movimentos propulsivos e empregada pelo peixe para percorrer grandes distâncias com velocidades aproximadamente constantes.
- b) Natação não permanente (transiente), movimentos muito rápidos que ocorrem em milissegundos e empregados apenas em último caso, como em situações de captura de presa ou fuga do predador. Incluem-se dentro desse modo de natação (Videler, 1993):
- Partidas Rápidas: são os movimentos mais clássicos da natação não permanente e usados na caça ou na fuga de peixes;
  - Viradas Rápidas: são manobras usadas por alguns peixes;

- Paradas bruscas: movimentos que são “armas” de alguns peixes para captura de presas;
- Natação de explosão e descanso: tipo de natação que se caracteriza por movimentos cíclicos de nado de explosão seguidos por uma fase de descanso onde o peixe não realiza movimento. A fase de explosão começa com uma velocidade inicial ( $u_i$ ) inferior a velocidade média ( $u_c$ ), acelerando até uma velocidade final ( $u_f$ ) maior que  $u_c$ . O ciclo se completa quando a velocidade inicial é novamente obtida através da desaceleração que ocorre na fase de descanso. A FIG. 2.10 mostra uma curva de velocidades desse modo de natação do bacalhau. A principal razão para uso desse modo reside na economia de energia.

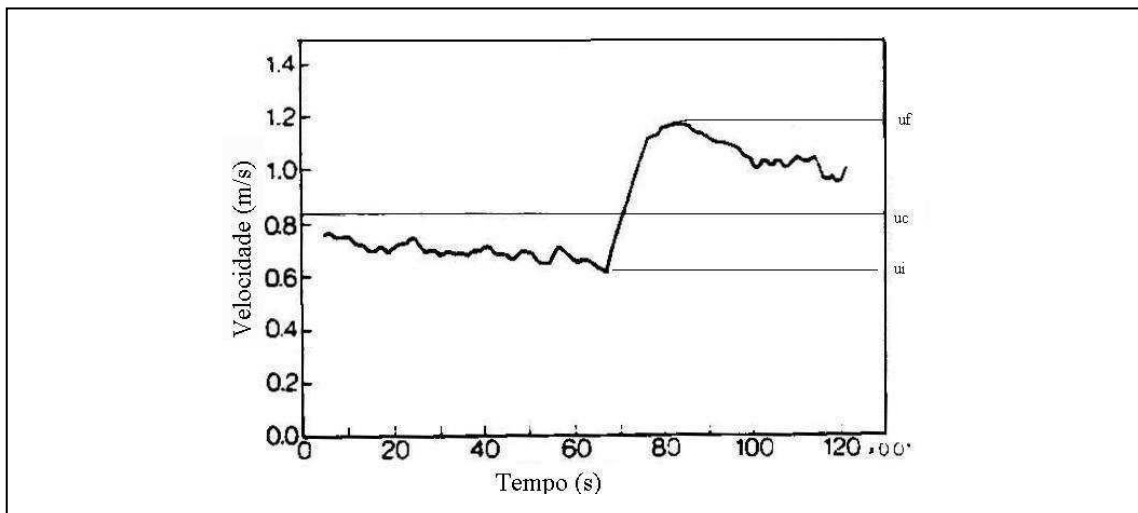


FIGURA 2.10-Curva de velocidades do modo de natação de explosão e descanso de um bacalhau

FONTE: VIDELER e WEIHS,1982, p. 128

É importante ser ressaltado, que a locomoção por natação apresenta diferenças também entre peixes de uma mesma espécie, variando com a idade e sexo. Além disso, determinadas características dos *habitats* também podem atuar na capacidade natatória dos peixes, sejam essas de caráter antrópico, como alterações na qualidade da água dos rios, ou de caráter natural.

### **2.1.2. Estudos sobre a capacidade hidrodinâmica e natatória dos peixes**

Antes de 1660, o primeiro registro que se tem sobre um estudo da física natatória dos peixes pertence à Aristóteles. Nos seus trabalhos (*História dos animais*, *Movimentos dos animais* e *Progressão dos animais*) o filósofo discutiu o número de nadadeiras que peixes possuíam, comparando os propulsores dos animais aquáticos com os órgãos locomotores apresentados pelas aves e pelo homem. Além disso, Aristóteles estudou de forma aprofundada as brânquias, descrevendo as de diferentes peixes e explicando seu mecanismo de funcionamento (Alexander, 1983).

Apesar de saber da existência de ar dentro dos peixes, através do som, Aristóteles nada escreveu sobre a bexiga natatória. Essa por sua vez só teve sua existência constatada em 1554 nos trabalhos de Guillame Rondelet (Alexander, 1983).

Mas foi no século XVII que houve uma explosão dos estudos sobre a hidrodinâmica dos peixes, impulsionados pelo desenvolvimento da Física Newtoniana e das técnicas de pesquisa com base na observação experimental. Os trabalhos de Arquimedes, contendo os conceitos de pressão hidrostática, tiveram sua primeira publicação em 1543; Galileo (1564-1642) mostrou a queda dos corpos com aceleração uniforme; Newton escrevia suas leis; Torricelli em 1643 realizava seu experimento que produziria o barômetro de mercúrio e um método de criar vácuo; tudo isso propiciou estudos mais aprofundados da estabilidade do peixe e de seu principal órgão gerador de empuxo: a bexiga natatória (Alexander, 1983).

Um dos experimentos mais interessantes realizados nessa época (1666) foi a colocação de um peixe baiacu sob efeito de uma coluna de mercúrio cuja pressão era menor do que a atmosférica. Assim, logo que foi introduzido nesse sistema, o peixe inchou, uma vez que de repente foi submetido à uma pressão menor do normalmente estava acostumado, e não conseguiu sair das proximidades da superfície d'água. Quando o mesmo foi submetido novamente à pressão atmosférica, o baiacu reassumiu sua forma original, mas afundou no recipiente. A dissecação posterior indicou que, de forma anormal, o peixe perdeu ar de sua bexiga natatória. Essas observações foram publicadas pela *Academia del Cimento in Florence* anonimamente. Anos depois (1675), um autor com as iniciais A. I. publica as conclusões do experimento acima na *Royal Society* de Londres. Deixando controvérsias autorais para as décadas futuras, esse trabalho sugere duas formas de utilização da bexiga

natatória: uma estática, como órgão que equilibra o peixe em uma determinada profundidade, e outra dinâmica, como órgão que pode criar mudanças no posicionamento vertical do peixe (Alexander, 1983).

Comprovando todas as duas funções da bexiga natatória, Giovanni Borelli em 1680, ilustrou sua discussão (FIG. 2.11) e argumentou também sobre o uso de determinadas nadadeiras na natação do peixe (Alexander, 1983).

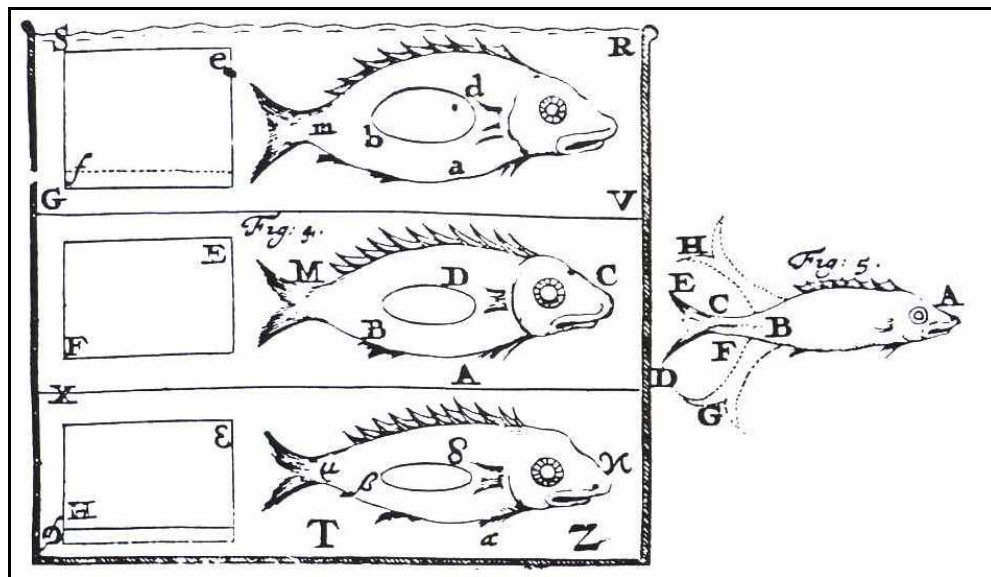


FIGURA 2.11-Diagramas de Borelli: na esquerda funcionamento da bexiga natatória e na direita a explicação da natação

FONTE: ALEXANDER, 1983, p. 5

Depois de mais progressos na mecânica e hidrodinâmica clássica, com Daniel Bernoulli (1700-1782), Euler (1707-1783), Navier (1785-1836) e Stokes (1819-1903), George Cayley (1809) tentou descobrir a forma hidrodinâmica ideal. Medindo as espessuras de uma truta ao longo do seu comprimento, ele desenhou um sólido em revolução com a mesma distribuição das espessuras. Um ano depois, este cientista publicou uma discussão sugerindo que as formas das trutas, seriam uma indicação de um sólido que sofre baixa resistência quando submetido a escoamentos em fluidos (Alexander, 1983).

Inicia-se então estudos com a construção de interessantes aparatos. Foi o caso do pesquisador Armand Moreau, em 1876, que resolveu estudar novamente a bexiga natatória. Querendo entender as hipóteses estática e dinâmica criadas para esse órgão, Moreau criou um aparato

que consistia num cilindro, vedável, ligado a uma bomba do tipo pistão e a um manômetro. Dentro do cilindro, era colocado o peixe, envolto numa gaiola que não permitia o movimento de suas nadadeiras. Acima dessa gaiola foi fixado um recipiente flutuante e abaixo um recipiente contendo mercúrio dentro (FIG. 2.12). Ajustando a quantidade desse mercúrio, Morerau fazia com que o peso da gaiola, somado ao do peixe, fosse o mesmo da água (Alexander, 1983).

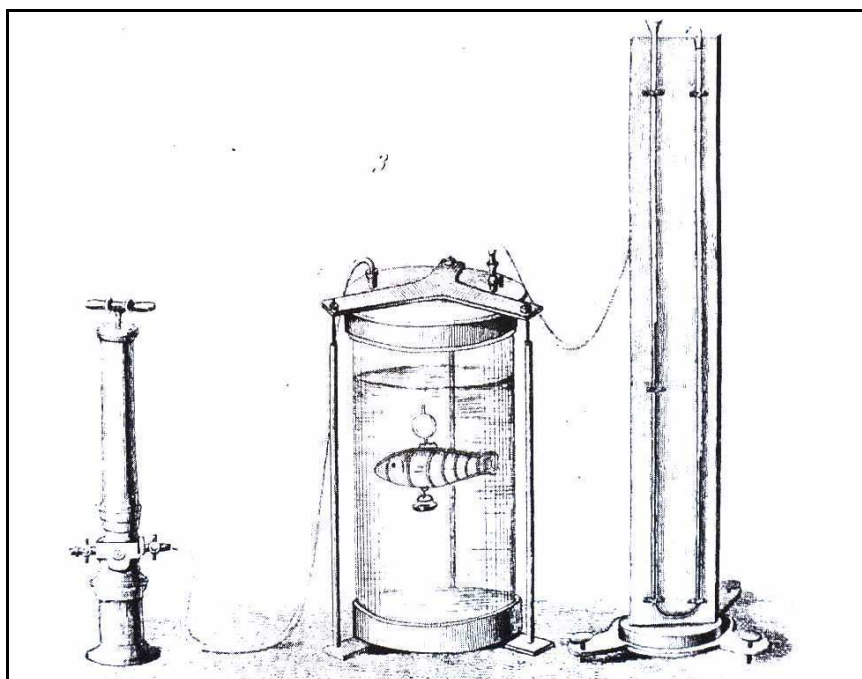


FIGURA 2.12- Aparato de Morerau para estudar o efeito de mudanças de pressão no volume do peixe.

FONTE: ALEXANDER, 1983, p. 11

Assim, através da bomba de pistão Morerau aumentava ou reduzia a pressão dentro do cilindro. Os testes mostraram que reduzindo a pressão, a bexiga expandia e o peixe flutuava. Aumentando a pressão, a mesma comprimia e o peixe afundava. Foi dessa maneira que o pesquisador chegou a conclusão que a diferença de pressão entre as duas situações extremas (o peixe totalmente no fundo e totalmente flutuando) era igual a pressão hidrostática da coluna d'água (Alexander, 1983).

Moreau também fez outro experimento para identificar os músculos capazes de provocar alteração no volume da bexiga natatória. Estimulando a contração com choques elétricos, ele



mediu alteração do volume água + peixe (FIG. 2.13) através do menisco de um capilar (A-B) (Alexander, 1983).

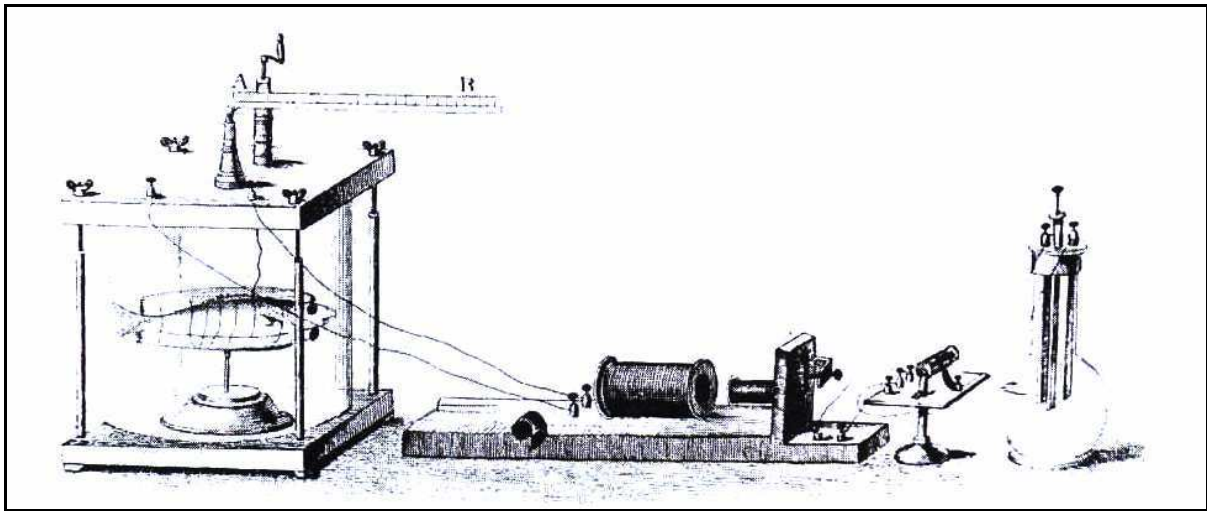


FIGURA 2.13- Aparato de Morerau para identificar os músculos capazes de alterar o volume da bexiga natatória.

FONTE: ALEXANDER, 1983, p. 12

Apesar de também trabalhar com a natação, as principais contribuições de Morerau foram os estudos relacionados à bexiga natatória. A explicação para insucesso dele e de outros pesquisadores na área de locomoção aquática foi a dificuldade de se trabalhar sem aparelhos de filmagem. Os primeiros trabalhos nessa área utilizaram seqüências de fotografias como os estudos de Muybridge em 1887 e Marey em 1894 (Alexander, 1983).

Com o passar do tempo, cada vez mais aumentava o interesse dos pesquisadores pela natação e pela capacidade dos peixes em vencer determinados escoamentos. No entanto, até 1912 praticamente todos os estudos sobre natação eram de caráter qualitativo. Apenas com Houssay é que se iniciaram os trabalhos quantitativos. Ele foi o primeiro pesquisador a medir a velocidade de nado de um peixe através da força que o mesmo utiliza para nadar. Para isso, o cientista amarrava o peixe a uma linha e essa a uma haste (ponto T) do sistema mostrado na FIG. 2.14. Nadando, o peixe criava uma força normal na haste e portanto um momento anti-horário na roldana. Essa por sua vez possuía uma outra haste, de cuja extremidade pendia um peso (extremidade T' e peso P). Esse peso criava um momento horário e portanto uma resistência à natação do peixe. Toda vez que o peixe conseguia vencer a resistência imposta pelo peso, a roldana rodava e acionava um circuito elétrico. Esse último estava ligado à um

registrator circular e suas canetas se moviam com o pulso elétrico (Alexander, 1983). De posse da força necessária na natação, Houssay calculava a potência requerida.

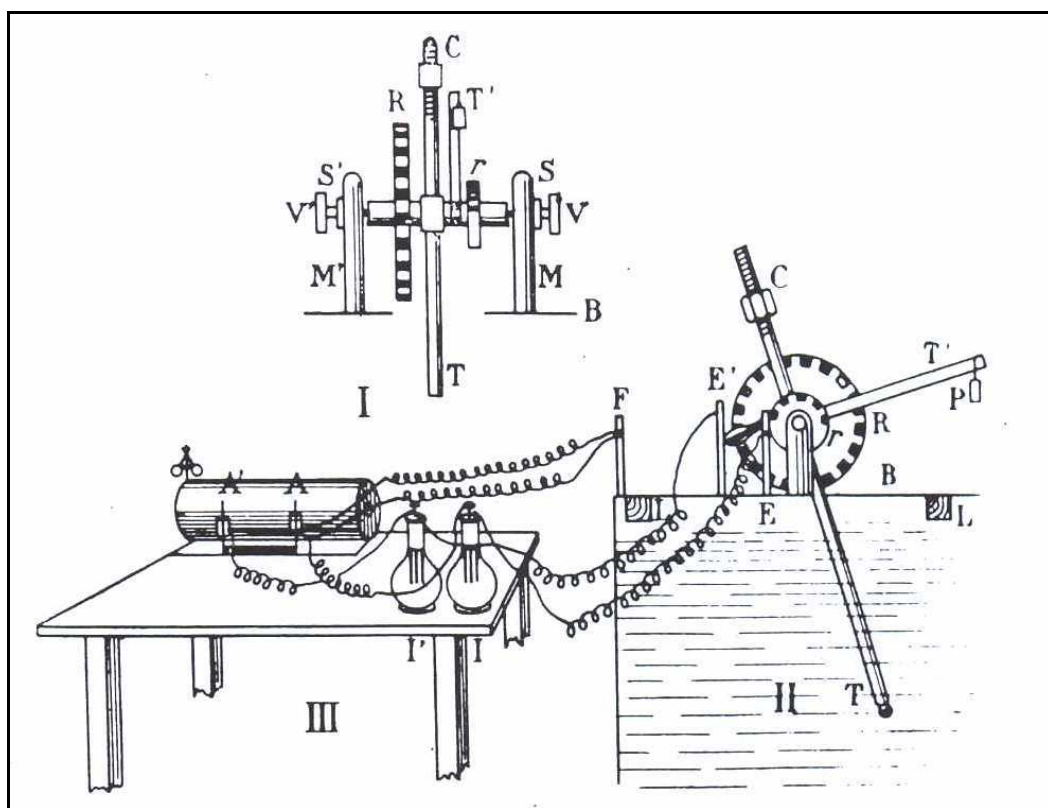


FIGURA 2.14- Aparato de Houssay para medir velocidade de natação dos peixes.

FONTE: ALEXANDER, 1983, p. 15

No entanto, o aparato de Houssay permitia apenas o cálculo da potência transmitida à máquina e desprezava a potência dissipada na água.

Os experimentos de Houssay foram prosseguidos por Magnan, que tentou medir o arrasto causado em um peixe morto que afundava em tanque. Com a cabeça do peixe direcionada para baixo, media-se a velocidade do movimento do mesmo através da marcação da distância e da tomada do tempo gasto nesse percurso. Posteriormente calculava-se a aceleração do peixe e a força necessária para vencer a resistência da água. Apesar da genialidade do trabalho, a suposição de que peixes de tamanho diferentes apresentavam a mesma aceleração fez com o trabalho tivesse críticas posteriores (Alexander, 1983).

Logo após a publicação dos testes de Magnan, Breder, em 1926, apresentou sua celebre classificação dos movimentos natatórios em relação ao das nadadeiras.

Iniciou-se então a era dos estudos aeronáuticos. Estava na natureza, a inspiração para o desenvolvimento dos aviões e com isso a locomoção dos peixes, por ocorrer em fluidos, ganhou mais atenção. Um exemplo disso foi dado pelo ministério aeronáutico francês, que financiou os estudos de Magnan. É nessa época também que aumenta a participação de engenheiros no estudo da natação dos peixes. O engenheiro Shoulejkin em 1929 colocou um modelo de um peixe voador, *Exocoetus*, em um túnel de vento para medir o arrasto e o empuxo criado pelo escoamento em vários ângulos de ataque. Outros dois engenheiros, Kempf e Neu em 1932 utilizaram um peixe morto, *Esox*, também para a medição de arrasto (Alexander, 1983). Mas de todos esses, foi Richardson em 1936 que, através de seus testes, começou a suspeitar da influência do muco da superfície do peixe na redução do arrasto (Richardson, 1936).

Todos esses estudos de arrasto culminaram então no paradoxo de Gray. No ano de 1936, esse zoologista calculou a potência necessária para um golfinho (mamífero marinho) se mover a uma velocidade 20 nós. O resultado desse cálculo foi algo inacreditável. Considerando que a resistência ao deslocamento do golfinho fosse igual à de um corpo rígido dentro de fluido em movimento, na mesma velocidade, era necessário que os músculos de tal animal produzisse 7 vezes mais energia do que os músculos presentes em outros tipos de mamíferos poderiam produzir (Gray, 1936).

Assim, Gray lançou uma grande dúvida, mas indicou um caminho que futuramente, com estudos mais aprofundados, esclareceria seu próprio paradoxo. Para ele os princípios da locomoção natatória estavam mais relacionados aos movimentos transversais de cada seção do corpo do peixe do que às ondas propagadas pelas contrações do mesmo, fato argumentado por Breder em 1926. Apoiado nessa constatação, Gray filmou o deslocamento de peixes, estudou a ondulação dos mesmos e constatou a importância da nadadeira caudal. Essa última observação foi feita através de um estudo onde Gray estimou a propulsão gerada por um peixe antes e depois da amputação de sua nadadeira caudal. Ele percebeu que ocorria uma perda de 40% na propulsão gerada.

Foram necessários quase 60 anos para que o paradoxo de Gray fosse esclarecido por dois irmãos engenheiros, os Triantafyllou. Mas antes disso, muitos pesquisadores fizeram exaustivos estudos sobre o assunto. Harris foi um deles. Sucessor de Gray, esse biólogo fez trabalhos junto com Breder e uma série de estudos na escola de aeronáutica de Gugenheim.

Harris, colocando peixes em um túnel de vento, calculou o número adimensional de Reynolds e estudou a importância das nadadeiras no equilíbrio do corpo (Alexander, 1983).

Após 1950, os avanços e as pesquisas realizadas por Gray e seus seguidores começam a trazer os matemáticos para o estudo da locomoção por natação. Taylor, Gadd e Lighthill são alguns exemplos. Mas de todos esses, o que mais ganhou destaque foi Lighthill, cujo estudo culminou com uma teoria sobre a força de propulsão e a potência necessária para gerá-la (Magnuson, 1978). Na sua pesquisa, Lighthill utilizou a filmagem da natação de um pequeno peixe (*Leuciscus*) realizada no laboratório de Gray em Cambridge (Alexander, 1983).

O desenvolvimento de uma teoria matemática para locomoção de peixes incentivou e possibilitou a vários pesquisadores, como Webb, Weihs, Blake, realizarem estudos aprofundados sobre a hidrodinâmica dos peixes. Atualmente esses estudos fornecem os fundamentos para qualquer pesquisa sobre capacidade hidrodinâmica e ajudam a compreender os comportamentos realizados pelos peixes durante o desenvolvimento de uma determinada velocidade. No entanto, apesar da teoria hidrodinâmica ser consolidada apenas recentemente, a observação das velocidades apresentadas pelos peixes data do início do século XX (Beamish, 1978).

De uma forma geral, os procedimentos para levantamento de velocidade de nado podem ser agrupados em duas categorias: as realizadas em campo, no *habitat* do animal, e as realizadas em laboratório. A obtenção dessas velocidades pode se dar de várias maneiras, desde a utilização de equipamentos de pesca até a colocação de transmissores de ondas acústicas no animal, os chamados rádio-transmissores. Os primeiros levantamentos de velocidade em campo consistiam em fisgar o peixe em um anzol e medir a distância através da linha juntamente com o tempo gasto no percurso (Beamish, 1978).

A medição em campo é capaz de fornecer uma série de informações a respeito do comportamento do peixe, mas, dentro da faixa de velocidades, sua principal contribuição está no levantamento das velocidades sustentáveis de cruzeiro e de cardume (Beamish, 1978). Isso acontece porque esses tipos de velocidades, principalmente as sustentáveis de cruzeiro, são empregadas pelos peixes durante longo período de tempo. Além disso, elas só são desenvolvidas em determinadas situações, como na presença de outros peixes, no caso da

velocidade de cardume, e sob certas condições físicas (do ambiente) e biológicas (do peixe), no caso da velocidade de cruzeiro.

No entanto, um dos problemas principais da medição em campo é o fato de esta apenas fornecer a velocidade do peixe e não possibilitar o monitoramento das linhas de fluxo da água nas proximidades do peixe. Dessa forma, a análise dos dados de campo se torna um pouco comprometida uma vez que não se sabe o verdadeiro valor da velocidade desenvolvida pelo animal. Porém, não deixam de ser significativas as informações obtidas através das medições em campo. Quase todos os métodos desse tipo de observação envolvem a captura do peixe para posterior soltura (Beamish, 1978).

O segundo tipo de observação abrange todas as metodologias empregadas dentro de laboratórios e consiste basicamente em confinar o peixe em um aparato, sendo o animal forçado ou não a nadar. As principais velocidades estudadas com essas metodologias são as velocidades prolongadas e as de explosão, podendo, em alguns casos, serem obtidas algumas velocidades sustentáveis (sem ser de cruzeiro ou de cardume) (Katopodis, 2005).

Como mencionado anteriormente, o processo da medição dessas velocidades em laboratório necessita de um aparato, que pode assumir inúmeras características e formas de operação. Dentro do grupo de experimentos que forçam a natação dos peixes, tem-se uma certa semelhança entre esses equipamentos no que diz respeito às chamadas câmaras de natação. Utilizadas para visualização do deslocamento do peixe, as câmaras permitem classificar os aparatos em dois grupos: os com câmara móvel e os com câmara fixa (Beamish, 1978).

Um exemplo clássico do primeiro grupo foi o canal circular (FIG. 2.15) primeiramente descrito por Fry e Hart em 1948, segundo Beamish (1978), e que posteriormente foi adaptado e empregado por muitos outros pesquisadores, entre eles Bainbridge e Brown (1958). O princípio básico de funcionamento desse mecanismo é bastante simples, consistindo em rotacionar o canal a uma velocidade igual a desenvolvida pelo peixe, permanecendo esse último estático em relação a um referencial externo ao canal. No entanto, para que esse funcionamento fosse possível foi necessário desenvolver inúmeras adaptações ao aparato.

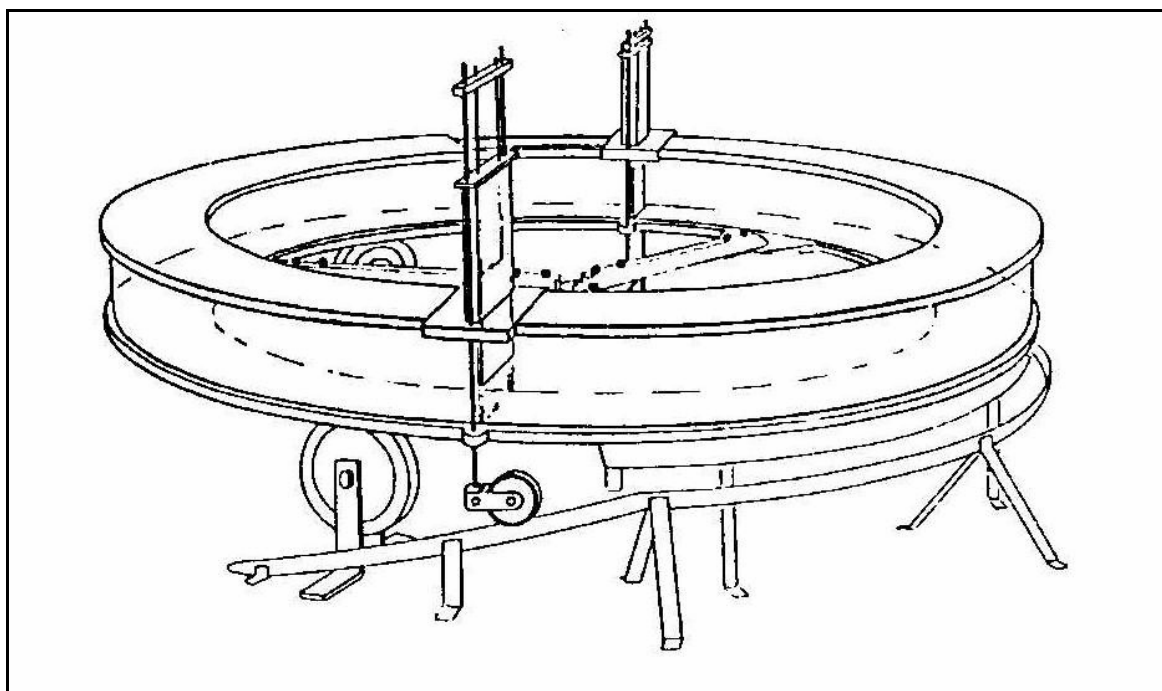


FIGURA 2.15-Perspectiva da roda de peixes

FONTE: BAINDRIDGE e BROWN, 1957. p. 114

Um dos problemas encontrados foi fazer a água mover com a mesma velocidade da roda. Para isso foram colocadas comportas ao longo do canal que ao serem fechadas e abertas imprimiam a água um movimento igual ao da roda. A rotação do equipamento é feita por um motor localizado abaixo da mesa que sustenta a roda. O diagrama transversal de todo aparato aparece indicado na FIG. 2.16.

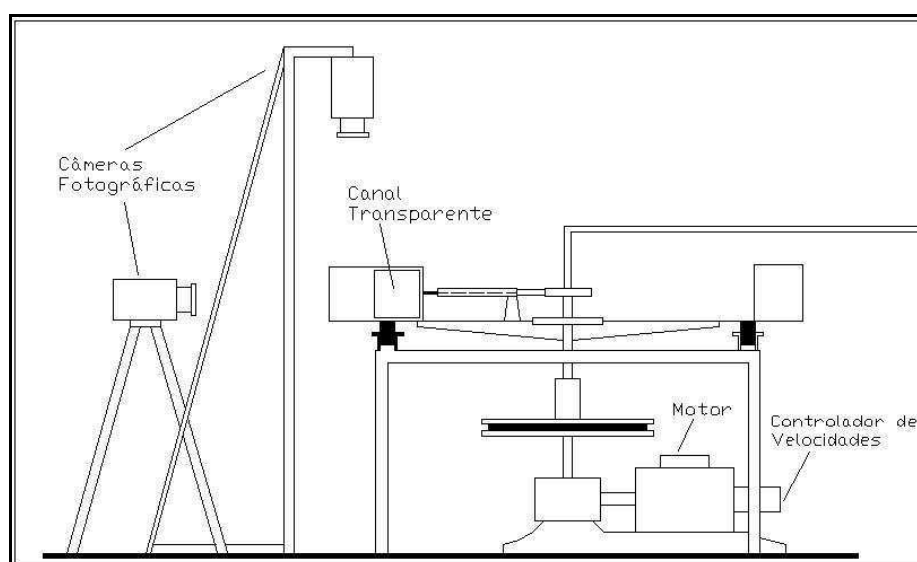


FIGURA 2.16- Diagrama transversal do aparato de canal circular móvel

FONTE: BAINDRIDGE, 1958. p.136

O segundo grupo de aparatos reúne todos aqueles que apresentam câmaras estáticas, podendo essas funcionar como canal ou conduto forçado. O escoamento da água pode acontecer através da gravidade ou pelo acionamento de bombas ou hélices (Beamish, 1978).

O esquema da FIG. 2.17 mostra um conjunto de tubulações nos quais é criado um escoamento gravitacional que pode ser controlado por válvulas. Já o aparato da FIG. 2.18 consiste de 2 cilindros concêntricos nos quais a água é direcionada para o cilindro interno através de uma hélice, retornando pela parte externa do mesmo. Um dos principais problemas desse mecanismo é a turbulência criada pela hélice no escoamento.

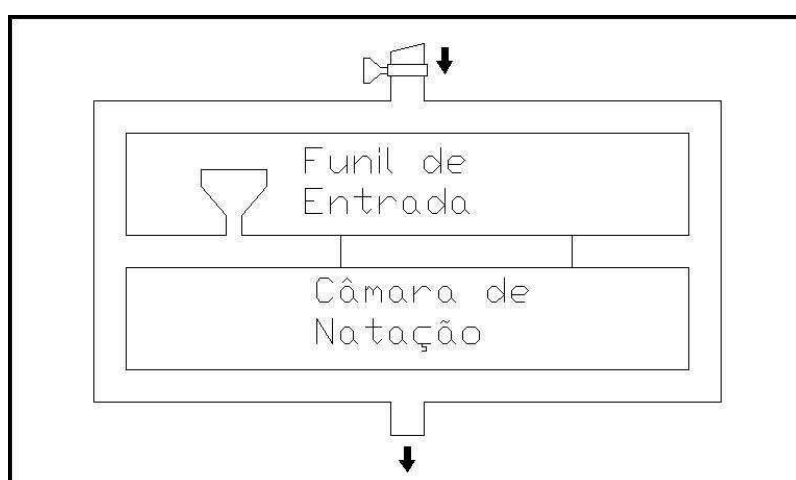


FIGURA 2.17 –Aparato desenvolvido por Bishai em 1960

FONTE: BEAMISH, 1978. p.124



FIGURA 2.18 –Aparato desenvolvido por Blazka, Volf e Cepala em 1960

FONTE: BEAMISH, 1978. p.124

Conhecido como respirômetro de Brett, o aparato da FIG. 2.19 é um dos mais utilizados para determinação de velocidades. Seu funcionamento é bastante simples, constituindo basicamente de um conduto forçado cujo escoamento é produzido pelo acionamento de uma bomba centrífuga. Por ser um dos mais estudados, esse tipo de equipamento sofreu várias adaptações à medida que foi sendo usado por diversos pesquisadores.

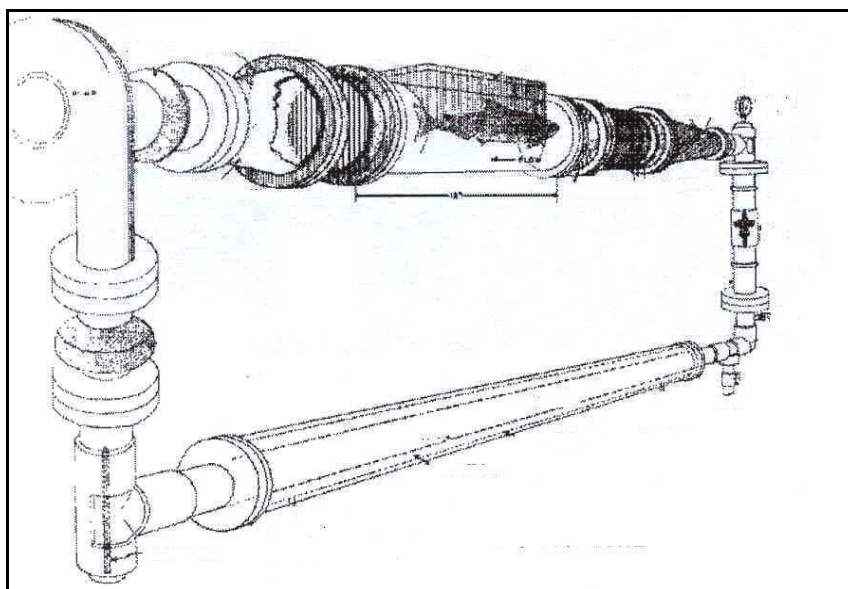


FIGURA 2.19 –Aparato desenvolvido por Brett em 1964

FONTE: BRETT, 1964. p. 1185 e 1186

O aparato desenvolvido por Thomas, Burrows e Chenoweth em 1964 (FIG. 2.20) tem seu funcionamento muito parecido com o aparato de Brett, se diferenciando pela presença de dois tanques, um deles pressurizado, que são unidos por dois condutos. O escoamento se dá através dos mesmos e é produzido pelo acionamento de uma bomba centrífuga.

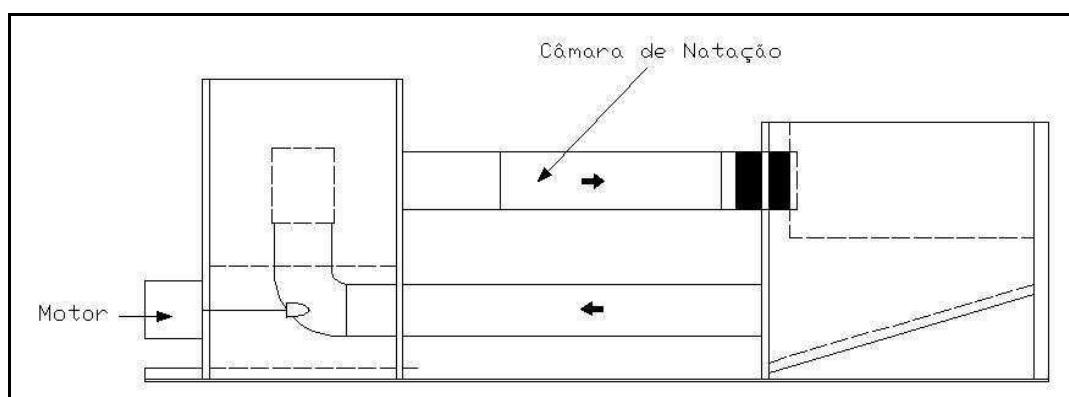


FIGURA 2.20 –Aparato desenvolvido por Thomas, Burrows e Chenoweth em 1964

FONTE: BEAMISH, 1978. p.124



Um dos trabalhos mais recentes realizado em aparatos de câmaras fixas foi o de Peake (2004). Para determinar a velocidade crítica do *Micropterus dolomieu*, foi utilizada a montagem mostrada na FIG. 2.21, cujo fluxo era criado por gravidade. O controle da velocidade dentro da tubulação era feito por meio de duas válvulas borboleta.

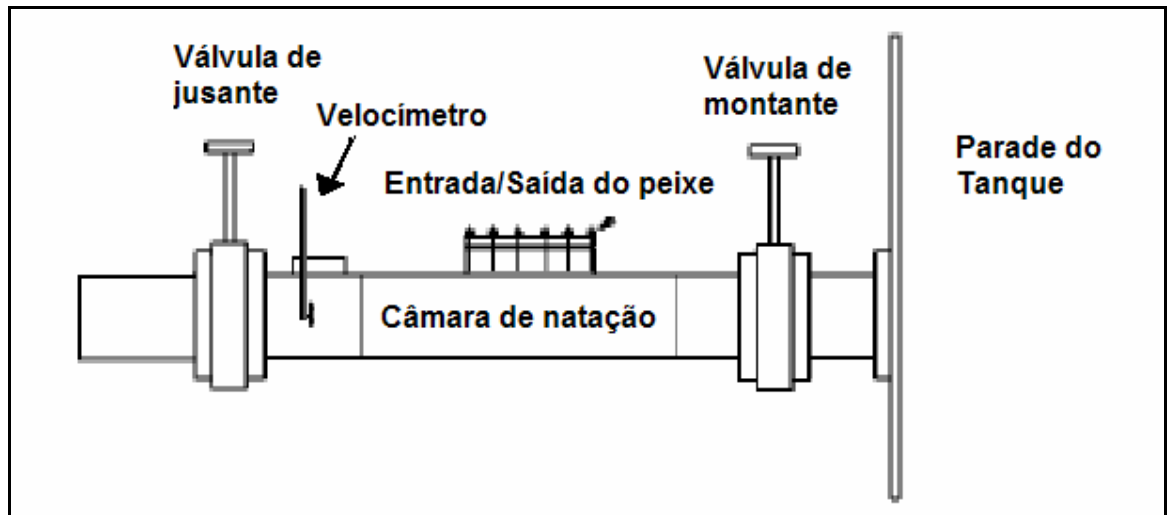


FIGURA 2.21 –Aparato utilizado para determinação da velocidade crítica do *Micropterus dolomieu*

FONTE: PEAKE, 2004. p.1473

No entanto, à medida que os estudos de laboratório se aprofundaram, houve a necessidade de se compreender as habilidades natatórias voluntárias, as estratégias de nado e as performances dos peixes sobre determinadas situações de turbulência (Katopodis, 2005). Com isso novas tecnologias foram adaptadas às medições em laboratório como o *pit-tag* e a radio-telemetria.

Assim, como era permitido ao peixe o uso voluntário do modo de natação, a utilização de canais hidráulicos para realização dos testes tornou-se uma opção mais interessante, já que a vantagem dos chamados respirômetros se limita às facilidades na produção de altas velocidades do escoamento, no qual o peixe é forçado a nadar. Além disso, com os canais cria-se uma condição mais próxima da encontrada naturalmente nos rios (Peake, 2004), livre de pressões decorrentes do escoamento de bombas e de alguns efeitos como o devido à proximidade das paredes (Webb, 1993).

Dessa forma, passou a ser inevitável uma comparação entre as velocidades obtidas nos testes voluntários e forçados, o que revelou um menor valor para os dados coletados em

respirômetros. Segundo Peake (2004), a explicação para isso está em duas razões: a primeira na recusa do peixe confinado em nadar até a sua completa exaustão fisiológica, já demonstrada por vários autores, e a segunda nas diferenças de custos energéticos associados à natação confinada (cujo procedimento obriga o peixe a nadar contra o escoamento) e à não-confinada (cujo procedimento permite ao peixe desenvolver a natação espontânea).

Apesar dessas constatações, ainda se faz necessária a realização de mais estudos com espécies confinadas em respirômetros, uma vez que a quantidade de informações sobre velocidade, obtidas nessas condições, permite comparações poderosas. Além disso, são necessários novos dados para comprovar que estudos com natação forçada geram dados subestimados em relação à capacidade de nado voluntário (Peake, 2004).

### 2.1.3. Hidrodinâmica do nado

A natação, por ser um modo de locomoção que ocorre em um meio fluído, sofre a ação de várias forças decorrentes da interação peixe e água. Assim, a divisão desses esforços compreende dois grupos: os oriundos do simples estado estacionário (FIG. 2.22a) e os devido ao deslocamento do peixe no fluído (FIG. 2.22b).

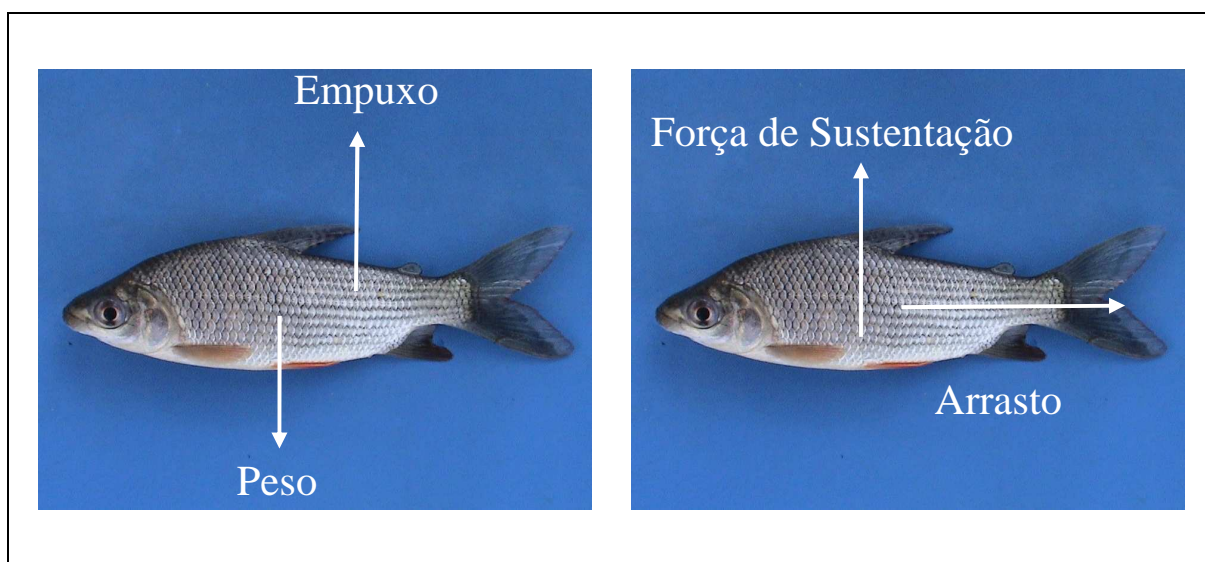


FIG. 2.22 a) Forças decorrentes da gravidade e da pressão do fluido

b) Forças decorrentes do deslocamento do peixe ou da água sobre o corpo do peixe

FOTO: POMPEU

Assim, analisando as FIG. 2.22a e FIG. 2.22b é possível perceber que o equilíbrio hidrostático do peixe é atingido através da compensação do peso pela força de empuxo, quando o mesmo está parado, e pela força de sustentação, quando existe a movimentação do animal ou o deslocamento do fluido pelo corpo do peixe.

O empuxo, descoberto por Arquimedes no século III a. C., é o resultado da aplicação das forças hidrostáticas sobre um objeto totalmente submerso ou flutuante (White, 2002) e seu valor é igual ao peso do fluido deslocado por esse objeto. Se imaginarmos que, na FIG. 2.23, o ponto 2 sofre a pressão de uma coluna d'água  $H2$  e ponto 1 a ação de uma pressão cuja coluna é  $H1$ , tem-se que a resultante é igual à força criada pela diferença de pressão entre os dois pontos, ou seja, o peso da água deslocada (EQ. 2.2). Pela FIG. 2.23 também fica claro o sentido da resultante (ou empuxo).

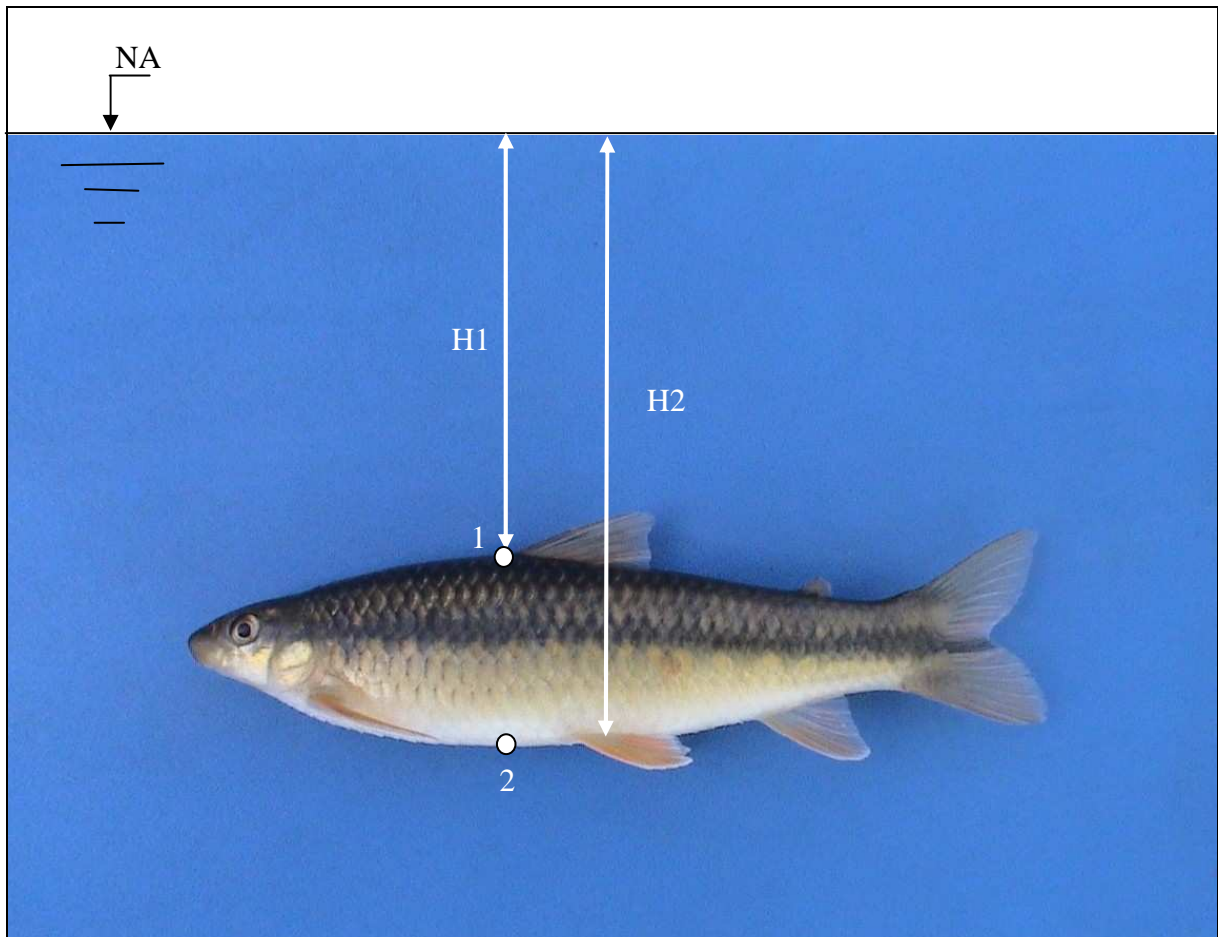


FIGURA 2.23- Empuxo no peixe

FONTE: POMPEU

$$\text{Empuxo} = M_{\text{água}} g = \rho_{\text{água}} V_{\text{peixe}} g \quad \text{EQ. 2.2}$$

$$\text{Empuxo} = \rho_{\text{água}} \frac{M_{\text{peixe}}}{\rho_{\text{peixe}}} g \quad \text{EQ. 2.3}$$

Pela EQ. 2.3 vê-se que o empuxo depende da densidade do peixe, que muitas vezes é maior do que a da água (Magnuson, 1978). Dessa forma, dificilmente essa força seria o principal esforço se a contrapor ao peso no equilíbrio hidrostático.

Também é importante salientar que o empuxo não acompanha o peso à medida que aumenta o porte dos peixes. Isso acontece porque uma mudança no comprimento tornará o peixe mais pesado numa taxa igual essa alteração elevada ao cubo (Magnuson, 1978), enquanto o empuxo, que é função do volume do peixe, aumenta numa proporção muito menor.

Assim, ao longo da evolução, os peixes desenvolveram uma adaptação que permite ao mesmo o controle da sua densidade e conseqüentemente do empuxo. Conhecida com bexiga natatória, essa adaptação provavelmente permitiu o aumento do porte dos peixes. Segundo Magnuson (1978), dentro da família Scombridae, cujos representantes são excelentes e rápidos nadadores, todas as espécies que apresentam mais de 70 Kg possuem bexigas natatórias enquanto que das que atingem até 6 Kg apenas 25% possuem esse órgão.

O peso também pode ser equilibrado pela força de sustentação, que surge quando ocorre o deslocamento do peixe ou da água sobre o mesmo. Assim, a importância desse deslocamento é tal que peixes sem bexiga natatória não podem parar de nadar, como no caso dos tuburões, uma vez que a sustentação é o principal instrumento de equilíbrio do peso.

Tanto as nadadeiras peitorais como o próprio corpo do peixe são capazes de gerar a sustentação (Magnuson, 1978), devido ao formato hidrodinâmico dessas estruturas. A FIG. 2.24 mostra esse formato e as linhas de corrente do escoamento.

Segundo White (2002) a sustentação é causada pela separação do escoamento que ocorre devido o bordo mais agudo do hidrofólio. Na realidade, a forma do hidrofólio faz com que a pressão seja menor no extradorso (onde estão os pontos A na FIG. 2.24) do que região de

intradorso (onde estão os pontos B na FIG. 2.24). Dessa forma, uma força para cima é criada e recebe o nome de sustentação.

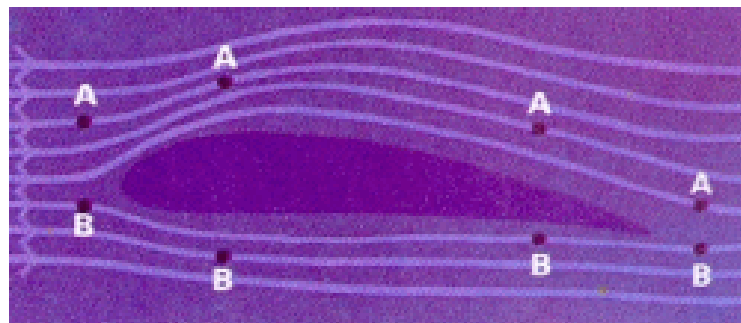


FIGURA 2.24 - Partículas do fluido passando pelo aerofólio

Como a força de arrasto, que será explicada mais à frente, a sustentação depende do ângulo de ataque formado entre a linha de corrente e a linha da corda (FIG. 2.25) e seu valor é dado pela EQ. 2.4, onde  $C_s$  é o coeficiente de sustentação,  $\rho$  a massa específica do fluido,  $V$  a velocidade do objeto imerso nesse fluido e  $A_p$  a área planificada (mostrada na FIG. 2.25), segundo White (2002).

$$F_s = \frac{1}{2} C_s \rho V^2 A_p \quad \text{EQ. 2.4}$$

A diferença de pressão entre as duas regiões do hidrofólio também cria vórtices no sentido mostrado na FIG. 2.26a e indicados na FIG. 2.26b no peixe.

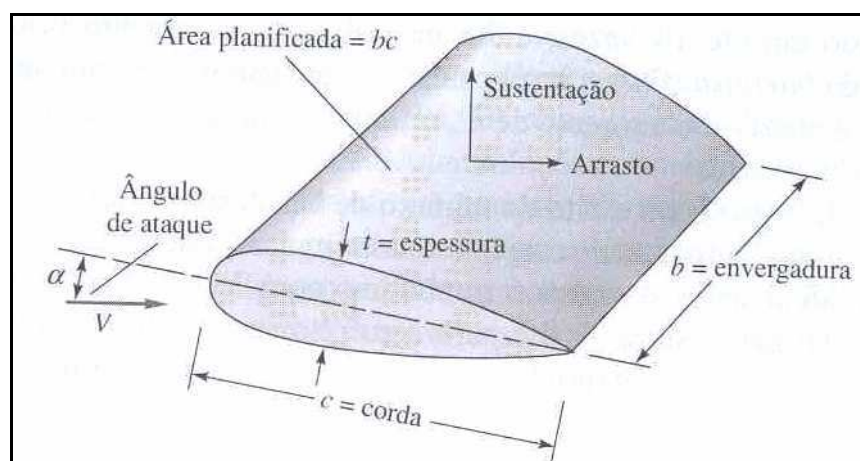


FIGURA 2.25- Hidrofólio e suas partes

FONTE: WHITE, 2002, p.

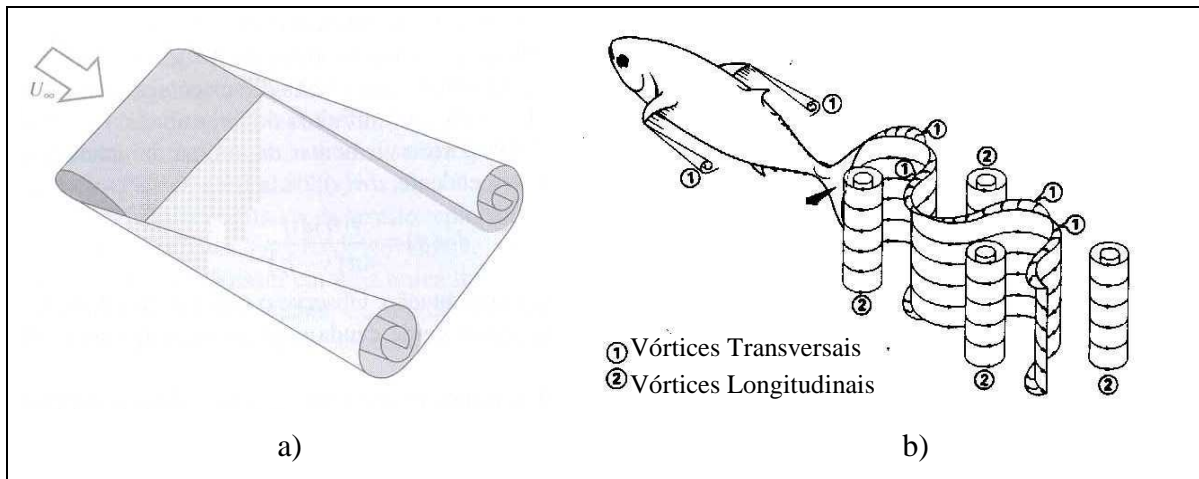


FIGURA 2.26 a) Formação de vórtices em um hidrofólio

FONTE: WHITE, 2002. p. 369

b) Vórtices nas nadadeiras peitorais e na cauda do peixe

FONTE: MAGNUSON, 1978. p. 272

Outra força que atua sobre o peixe quando existe o deslocamento do mesmo ou do fluido sobre seu corpo é o arrasto. Esse esforço, de direção horizontal, é essencialmente uma perda de escoamento e deve ser superado se o corpo tiver de se mover contra a corrente (White, 2002). Sua fórmula é:

$$F_A = \frac{1}{2} C_a \rho V^2 A \quad \text{EQ. 2.5}$$

onde  $C_a$  é o coeficiente de arrasto,  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $V$  a velocidade desse último e  $A$  área do objeto (que pode ser a planificada, frontal ou molhada).

A geração do arrasto ocorre devido à vários fenômenos e é de acordo com cada um deles que essa força pode ser dividida em:

- Arrasto de atrito, que é um efeito da tensão cisalhante (White, 2002) e atua sobre a superfície do peixe. Para reduzir esse tipo de arrasto os peixes produzem um muco que auxilia a redução da tensão cisalhante principalmente nos escoamentos viscosos (com baixos números de Reynolds) (Videler, 1993);

- Arrasto de pressão, que é resultado da diferença de pressão entre a região frontal do peixe e a parte traseira (White, 2002), aonde ocorre a separação da camada limite (FIG. 2.27).

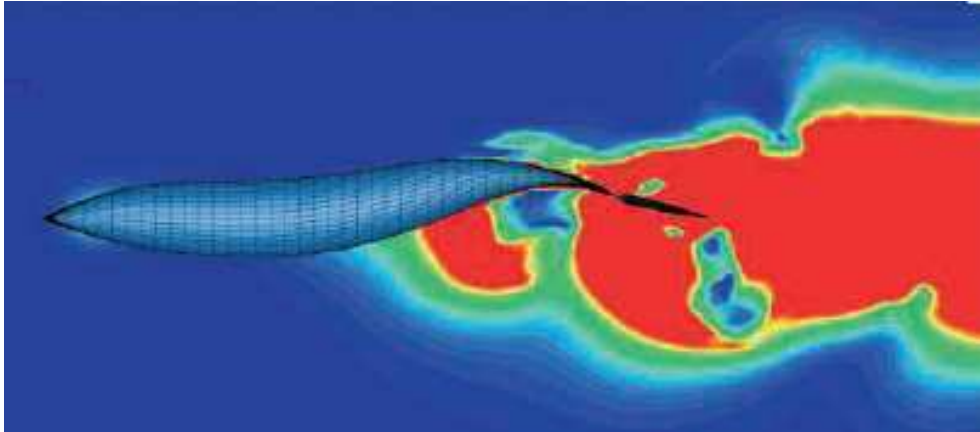


FIGURA 2.27- Diferença de pressão entre a parte anterior e posterior de um peixe visto em planta. Azul alta pressões e vermelho baixas pressões.

FONTE: WOLFANG et. al, 1999. p. 2314

- Arrasto induzido, que só ocorre em corpos com sustentação. Como foi explicado anteriormente, a força de sustentação se deve à diferença de pressão entre a parte superior e inferior do hidrofólio. Esta sustentação hidrodinâmica não é produzida sem perdas. O aparecimento de regiões com pressões diferentes, que leva ao aparecimento da sustentação, também gera vórtices FIG. 2.26 a e b. A indução do movimento rotacional da água atrás do peixe em forma de esteira adiciona mais arrasto.

Todo escoamento em torno de um objeto imerso pode ser dividido em duas regiões: uma aonde as forças viscosas são mais significativas e em outra considerada praticamente não viscosa. Essas duas regiões são interligadas nas bordas de uma camada cisalhante ou de uma camada limite. Dessa forma, para se quantificar a importância das forças viscosas, foi criado um número adimensional que possibilita comparar essas forças, representada pelo denominador da EQ. 2.6, com as forças inerciais do escoamento, indicadas no numerador. Quanto maior o número de Reynolds, ou seja, quanto mais turbulento o escoamento, menor serão as forças viscosas.

$$Re = \frac{\rho AV^2}{\mu AVl^{-1}} = \frac{\rho V l}{\mu} \quad \text{EQ. 2.6}$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $A$  a área do corpo submerso,  $l$  o comprimento do corpo,  $V$  a velocidade de deslocamento ou do corpo ou do fluido, e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido.

Assim, a espessura da chamada camada limite está relacionada com as forças viscosas do escoamento. Quando o regime é laminar, isto é, baixo número de Reynolds, a região viscosa é mais espessa (FIG. 2.28a). À medida que o escoamento vai se tornando mais turbulento, a espessura dessa região diminui (FIG. 2.28b). Isto é possível quando o  $Re$  é mantido, obtendo assim os chamados escoamentos equivalentes (laminar e turbulento).

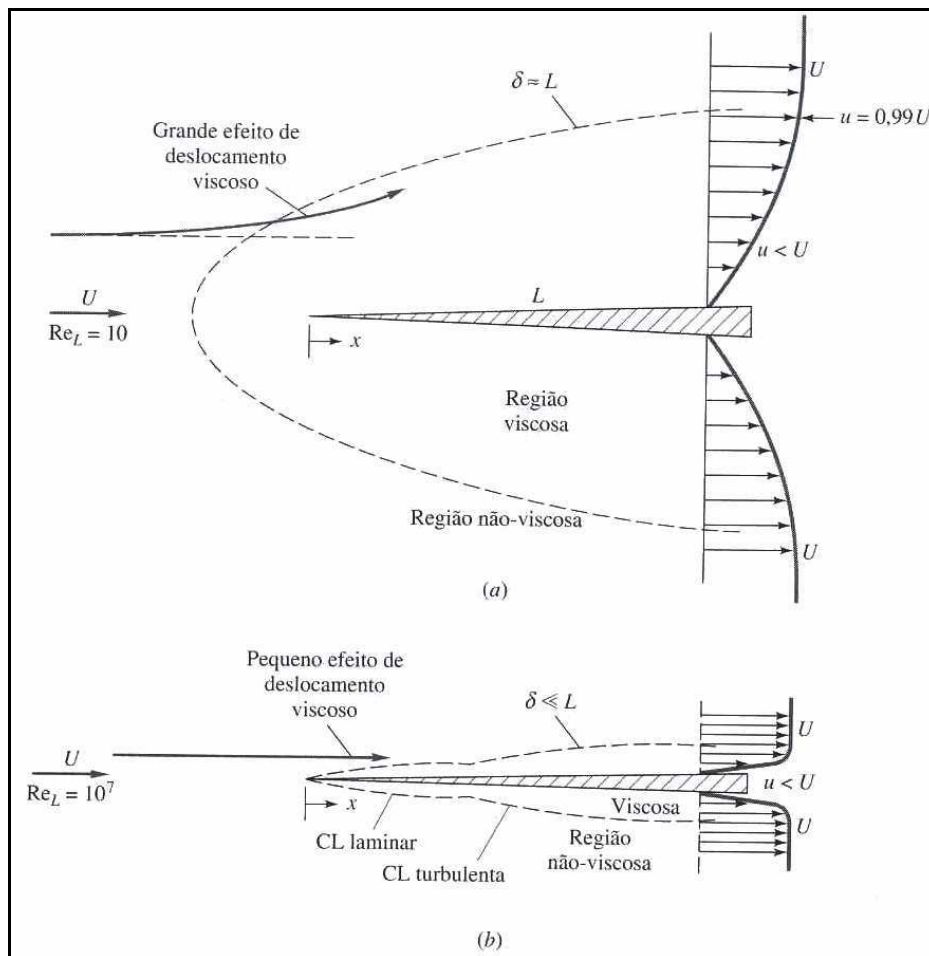


FIGURA 2.28 – Comparação dos escoamentos em torno de uma placa aguda com número de Reynolds baixo e alto:

- a) escoamento com  $Re$  baixo;
- b) escoamento com  $Re$  alto.

FONTE: WHITE, 2002. p. 302



O cálculo do coeficiente de arrasto, que irá atuar sobre o corpo imerso no escoamento, está relacionado com as forças viscosas e, portanto, com a espessura da camada limite. Assim, se o efeito do gradiente de pressão, que será explicado mais adiante, for desprezado, à medida que o escoamento vai se tornando mais turbulento, maior é o coeficiente de arrasto (FIG. 2.29). Isso se deve ao aparecimento da camada limite turbulenta. A FIG. 2.29 mostra a evolução do coeficiente de arrasto à medida que o escoamento passa do laminar para o turbulento completamente rugoso. Pela FIG. 2.29 é possível perceber que quanto mais rugosa uma placa (menor  $l/d$ ), maior será seu coeficiente de arrasto, pois tal rugosidade induz a camada limite turbulenta.

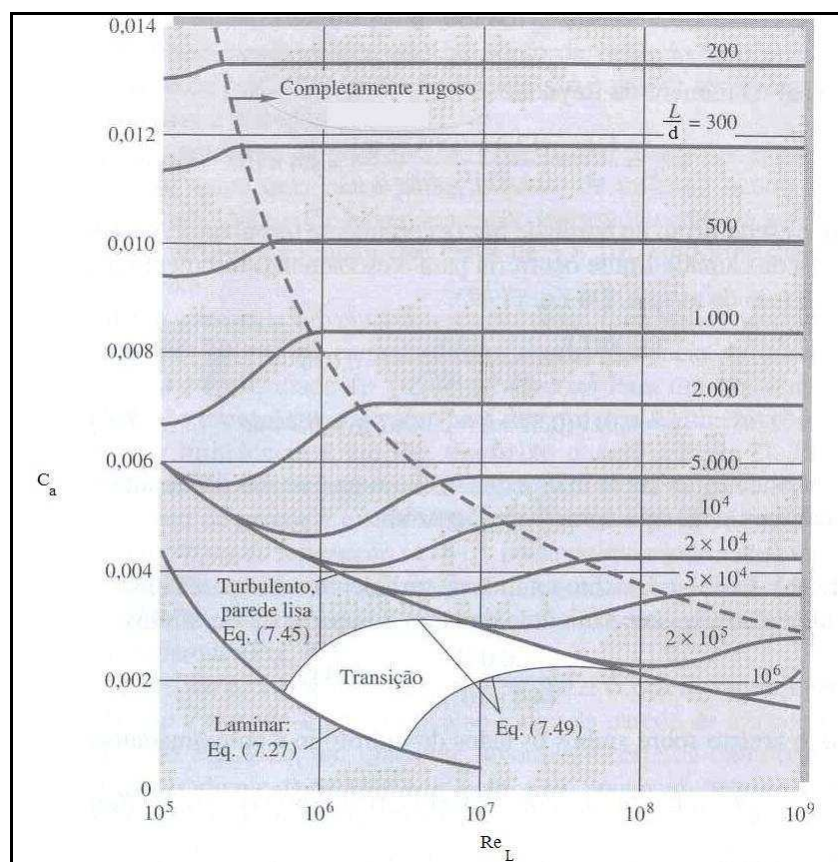


FIGURA 2.29- Coeficiente de arrasto para diferentes números de Reynolds e para diferentes rugosidades sobre placas

FONTE: WHITE, 2002. p. 311

No entanto, pode-se afirmar que a relação explicada anteriormente entre o arrasto e as forças viscosas dizem respeito apenas à contribuição do arrasto de atrito. Os efeitos de pressão são

desprezados uma vez que se estuda a camada limite sobre placas paralelas à direção do escoamento.

Assim, quando se considera a pressão, a ocorrência de um efeito adverso dessa última ocasiona a chamada separação da camada limite, que constitui basicamente num refluxo do escoamento próximo a superfície do objeto (FIG. 2.30).

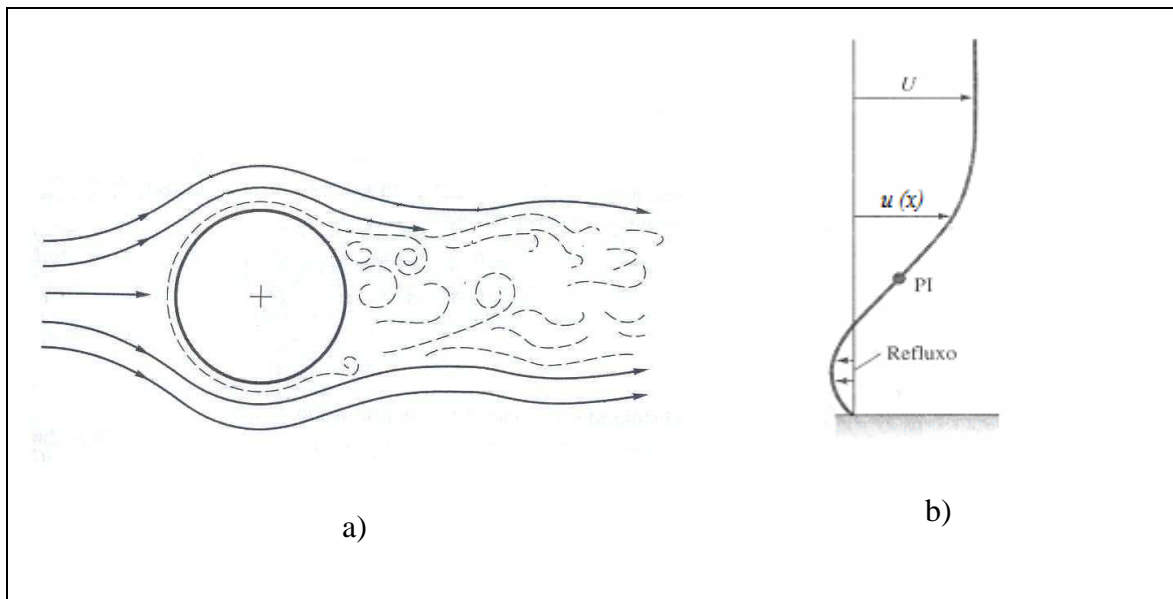


FIGURA 2.30- Gradiente de pressão adverso: separação da camada limite (a) e refluxo (b).

FONTE: WHITE, 2002, p.313. e p. 303

Como explicado anteriormente, uma parte do arrasto total se deve à diferença de pressão entre a parte anterior e a parte posterior de um objeto imerso no escoamento. Assim, no escoamento turbulento, a separação da camada limite é retardada e a diferença de pressão é menor caso o escoamento fosse laminar. A FIG. 2.31a ilustra um cilindro no escoamento laminar e a FIG. 2.31b o mesmo cilindro no escoamento turbulento. Na primeira situação o coeficiente de arrasto é igual a 1,2 enquanto que no regime turbulento  $C_a$  é igual a 0,3. A FIG. 2.31c mostra como a diferença de pressão, representada por  $C_p$  diminui passando do laminar para turbulento e com o aumento do ângulo de separação (até um certo valor).

A camada limite laminar é muito mais vulnerável ao gradiente adverso de pressão do que a camada turbulenta. Dessa forma, em algumas situações, o aparecimento dessa última camada é induzido para redução do arrasto. Essa indução se dá através da rugosidade, como no caso das bolas de golfe que possuem cavidades para diminuir a força de arrasto (White, 2002).

Existe uma suspeita que alguns peixes utilizem o mesmo princípio das bolas de golfe. Espécies, como as dos cascudos, apresentam grandes rugosidades e têm preferências por áreas de altas velocidades do escoamento (FIG. 2.32).

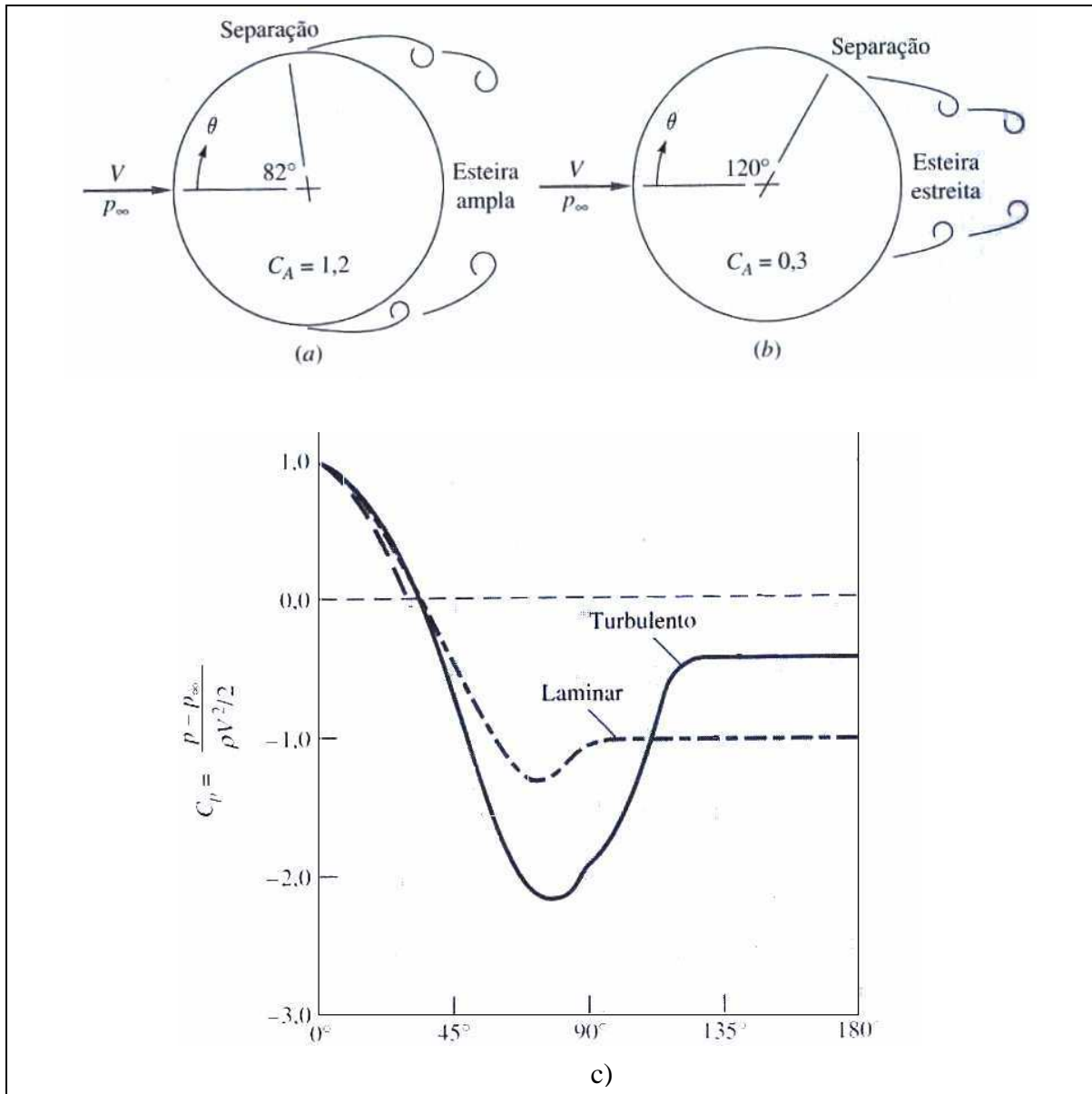


FIGURA 2.31- Escoamento em torno de um cilindro a) separação laminar b) separação turbulenta c) distribuições de pressão

FONTE: WHITE, 2002, p.318.

Assim, o ponto de ocorrência da separação do escoamento influencia em muito a grandeza do arrasto. Além da rugosidade e das forças viscosas, outro fator que pode determinar essa separação é o formato do corpo. A FIG. 2.33 ilustra a importância da chamada carenagem,

uso de linhas aerodinâmicas, na diminuição do arrasto. Os peixes em geral apresentam um corpo com formato bem aerodinâmico, o que reduz o arrasto sofrido pelo mesmo.



FIGURA 2.32 – Rugosidade de um cascudo

FOTO: POMPEU

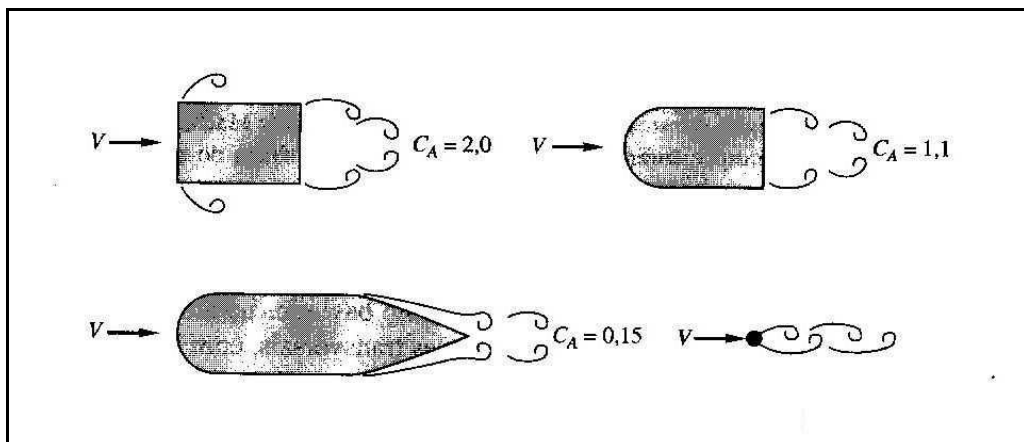


FIGURA 2.33- Importância da carenagem na redução do arrasto de um corpo

FONTE: WHITE, 2002 p. 319

Os peixes contam ainda com outras adaptações para aumentar a eficiência de sua propulsão além da redução do arrasto sofrido durante sua locomoção. O fato de movimentar a cauda faz com que esses animais tenham um controle impressionante sobre o escoamento em torno dos seus corpos, extraindo energia das ondas, das turbulências e inclusive de sua própria esteira (Triantafyllou e Triantafyllou, 1995).

Com a separação da camada limite surge o aparecimento de uma esteira turbilhonária. Após de qualquer objeto imerso em fluido, ocorre o aparecimento dessa esteira, cujos vórtices apresentam o sentido mostrado na FIG. 2.34a e FIG. 2.34b. O mesmo não acontece com o peixe, que através do batimento de sua cauda inverte a rotação desses vórtices (FIG. 2.34c) (Triantafyllou e Triantafyllou, 1995).

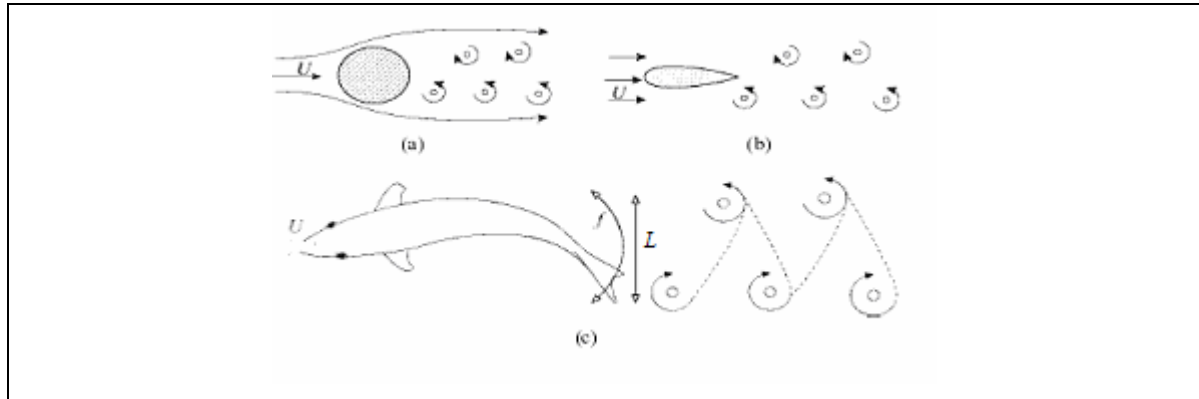


FIGURA 2.34- a) e b) Vórtices formados no escoamento passando por diferentes corpos  
c) vórtices formados pelo batimento da cauda do peixe

FONTE: SFAKIOTAKIS, LANE e DAVIES 1999 p. 242

O entendimento da importância dessa inversão dos vórtices da esteira turbilhonar foi essencial para o esclarecimento do paradoxo de Gray, já mencionando anteriormente. Segundo os cálculos desse cientista, considerando um golfinho um corpo rígido imerso em um escoamento, a potência necessária para esse mamífero nadar a uma velocidade de 20 nós seria 7 vezes maior do que a fornecido pelos músculos existente no animal (Gray, 1936).

Foram necessários muitos estudos e quase 60 anos para compreender tal questão. Em 1993, os irmãos e engenheiros Triantafyllou publicaram os resultados obtidos com a construção de um aerofólio que oscilava no fluido. Os pesquisadores observaram que, para inverter os vórtices, era necessário que a frequência e a amplitude da oscilação do aerofólio assumissem determinados valores.

Para quantificar melhor essa oscilação foi utilizado o conceito do número adimensional de Strouhal, muito empregado para descrever as esteiras de vórtices formadas atrás de obstruções no escoamento. Tal parâmetro (EQ. 2.7) foi estudado pelo físico alemão Strouhal em 1878 e relaciona a frequência de emissão dos vórtices ( $f$ ) com a velocidade média na seção transversal do escoamento ( $U$ ) e com a dimensão característica do corpo sólido ( $L$ ), que pode

ser o diâmetro ou a distância perpendicular ao sentido do escoamento (White, 2002 e Vogel, 1994).

$$St = \frac{fL}{U} \quad \text{EQ. 2.7}$$

No caso dos peixes  $f$  seria a frequência de batimento da cauda,  $U$  a velocidade média do deslocamento do peixe e  $L$  a amplitude do rastro formado pelo peixe, como indicado na FIG. 2.34c (Triantafyllou e Triantafyllou, 1995).

Assim, utilizando-se do aerofólio, os pesquisadores perceberam que a inversão dos vórtices só ocorria numa faixa de Strouhal entre 0,25 e 0,35.

A suspeita da importância dessa descoberta fez com os Triantafyllou determinassem os números de Strouhal para vários peixes. O resultado mostrou que, como esperado, a maioria desses animais tinha sua natação ocorrendo dentro faixa descoberta, como mostrado na FIG. 2.35.

Com o controle da “vorticidade”, os peixes possuem três modos diferentes de produzir propulsão, criando (Gopalkrishnan et al., 1994):

- os vórtices com batimento da cauda que interagem construtivamente com os vórtices que normalmente ocorrem atrás de objetos imersos num escoamento, gerando vórtices mais fortes com sentido oposto à esteira de von kármán;
- os vórtices com batimento da cauda que interagem destrutivamente com os vórtices que normalmente ocorrem atrás de objetos imersos num escoamento, gerando vórtices mais fracos com sentido oposto à esteira de von kármán;
- vórtices com batimento da cauda que emparelham com os vórtices que normalmente ocorrem atrás de objetos imersos num escoamento (de sentido contrário), gerando uma esteira cujos vórtices são descentralizados da linha de propulsão.

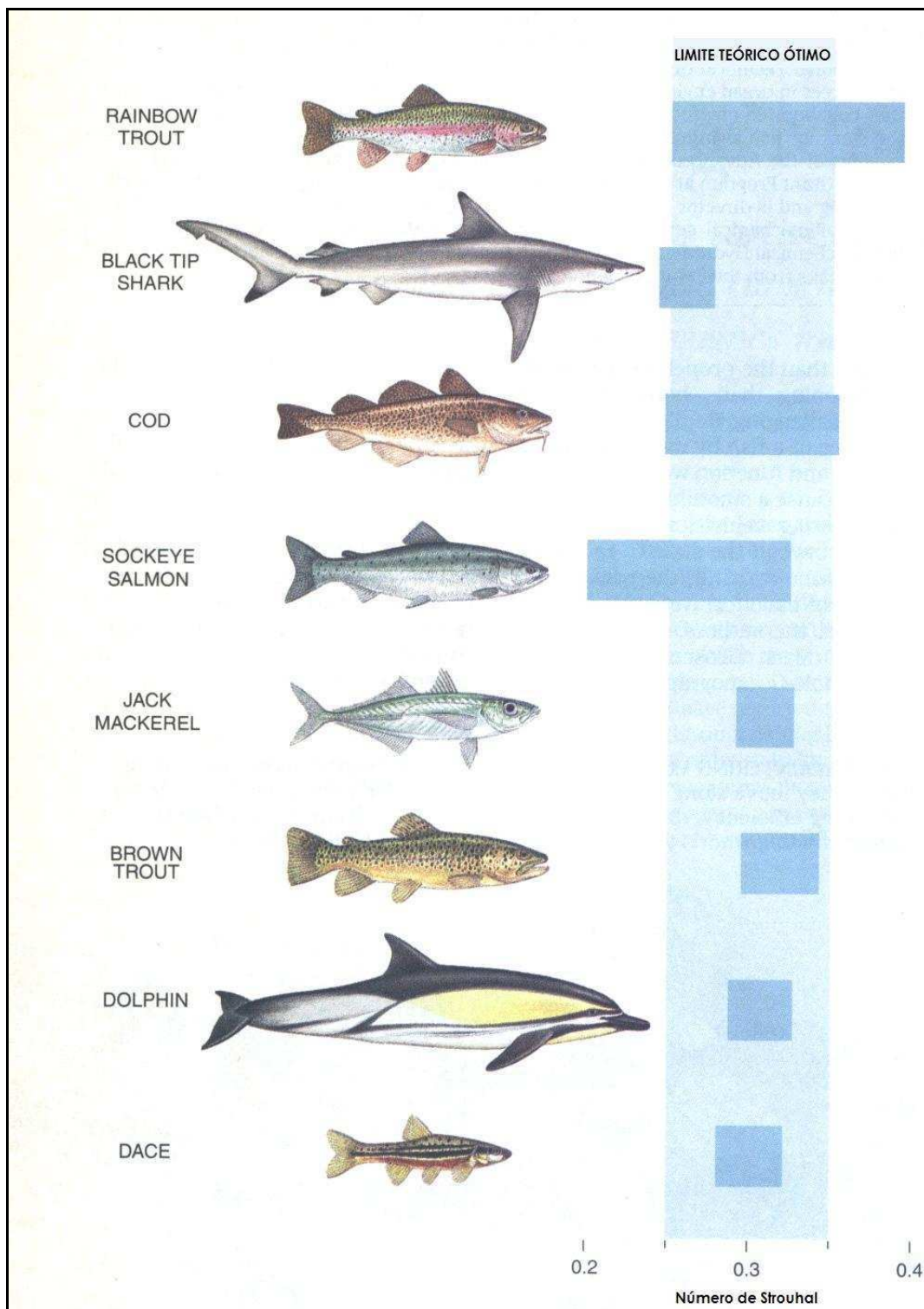


FIGURA 2.35- Estudo do número de Strouhal feito para diferentes tipos de peixes e mamíferos

FONTE: TRIANTAFYLLOU e TRIANTAFYLLOU, 1995 p. 42

A compreensão do comportamento hidrodinâmico do peixe fornece a base da análise que deve ser realizada durante os testes de capacidade natatória. Um exemplo disso é argumentação que existe sobre os estudos de natação realizados em aparatos cujo escoamento é confinado. Segundo Peake (2004), os valores de velocidade obtidos nesses aparatos são menores do que os obtidos em canais com largura significativa em relação à espessura do peixe. Talvez, o confinamento dos vórtices do escoamento pode ter alguma influência no processo de produção de propulsão e conseqüentemente na velocidade apresentada pelo peixe.

#### 2.1.4. Peixes migradores neotropicais

A América do Sul se caracteriza por apresentar uma grande malha hídrica que atravessa diferentes regiões nos aspectos geológicos, geofísicos e climáticos. Conseqüentemente rica é a diversidade das suas comunidades de peixes, que apresentam grande número de espécies se comparadas com as aquelas encontradas em regiões temperadas.

Estando na região neotropical, que abrange as Américas do Sul, Central e sul do México, os peixes brasileiros possuem parte significativa de suas espécies vivendo em água doce. A FIG. 2.36 mostra as principais bacias da América do Sul.

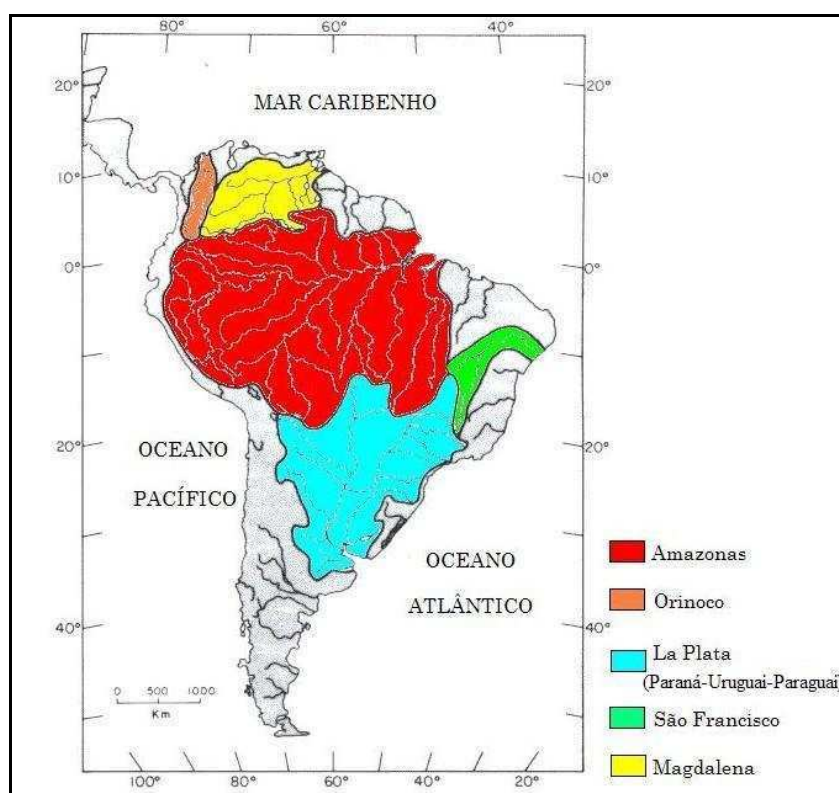


FIGURA 2.36-Principais bacias da América do Sul

FONTE: Adaptado de DEPETRIS e PAOLINI, 1991



Apesar de estarem separados em bacias diferentes, alguns peixes apresentam grande mobilidade podendo inclusive se deslocarem da água doce para água salgada ou vice e versa. A esses peixes é dado o nome de migradores enquanto que os outros, que não apresentam essa dinâmica, recebem a classificação de não-migradores. De uma forma geral, os peixes que migram possuem um ciclo de vida dividido em fases que na maioria das vezes ocorrem em diferentes locais ou até sistemas. De acordo com essa localização tem-se a subdivisão dos peixes migradores em (Porcher e Travade, 2002) :

- ❖ Potamódromos, peixes que tem todo seu ciclo de vida realizado em água doce mas que, no entanto, apresentam sítios de alimentação diferentes dos sítios de reprodução.
- ❖ Diádromos, peixes que apresentam parte do seu ciclo de vida realizado em água doce e parte em água salgada. Podem ser divididos ainda em:
  - Anádromos, peixes que nascem e se reproduzem em água doce mas se desenvolvem no mar.
  - Catádromos, peixes que nascem e se reproduzem em água salgada mas que se desenvolvem em água doce.
- ❖ Oceanódromos: Peixes que migram em ambiente marinho (Bond, 1979)

Os peixes migradores são os mais impactados pela instalação de obras civis que alteram o escoamento natural de um curso da água. A migração é um deslocamento fundamental para manutenção dessas espécies. A FIG. 2.37 ilustra o ciclo de vida das principais espécies migradoras brasileiras (Godinho e Pompeu, 2003).

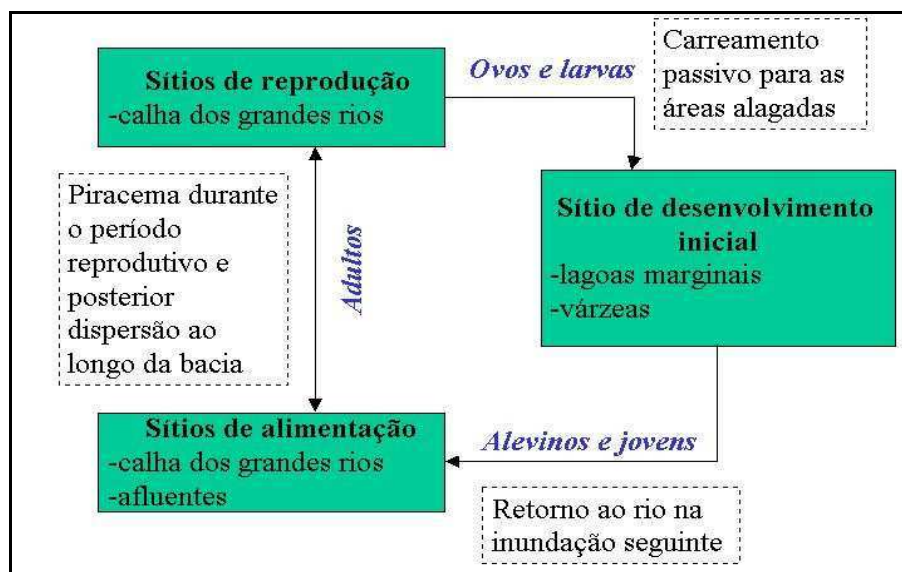


FIGURA 2.37- Ciclo de vida das principais espécies migradoras brasileiras.

FONTE: Adaptado de GODINHO e POMPEU, 2003.

Dentre os peixes de água doce, as espécies migradoras contituem um grupo menor com relação ao número de espécies, quando comparadas com os não migradores. No entanto, em muitos rios, elas podem representar uma parte considerável da biomassa, o que torna freqüente e de grande relevância os problemas com a ictiofauna causados por barramentos. Estas espécies também se destacam pelo grande valor comercial uma vez que, na maioria das vezes, apresentam grande porte. Dessa forma, os mecanismos de transposição de peixes instalados no Brasil e nos principais rios da América do Sul visam permitir a passagem das espécies migradoras, que são principalmente potamódromas.

Escolher a América do Sul como unidade de estudo foi decorrência de sua história biogeográfica em comum. Com isto, boa parte dos gêneros de espécies de peixes migradores está distribuída pelas principais bacias do continente. Este é o caso dos três gêneros estudados, que apresentam grande distribuição na região (TAB. 2.1).

TABELA 2.1

Distribuição e número total de espécies (N) dos gêneros *Prochilodus*, *Leporinus* e *Pimelodus* na região Neotropical

Gênero	N	Distribuição (bacias)
<i>Prochilodus</i>	31	São Francisco, Leste Brasileiro, Paraná-Paraguay, Uruguai, Magdalena, Atrato, Maracaibo, Orinoco e Amazonas.
<i>Leporinus</i>	87	São Francisco, Leste Brasileiro, Paraná-Paraguay, Uruguai, Magdalena, Atrato, Maracaibo, Orinoco, América Central e Amazonas.
<i>Pimelodus</i>	24	São Francisco, Paraná-Paraguay, Uruguai, Magdalena, Atrato, Maracaibo, Orinoco, América Central e Amazonas.

FONTE: REIS, KULLANDER e FERRARIS, 2003

Das diversas ordens de peixes encontrados na América do Sul, quatro se destacam pelo número de espécies. São elas: Characiformes, Siluriformes, Perciformes e Gymnotiformes. Entre essas, as duas primeiras são as que apresentam peixes migradores conhecidos.

Os Characiformes abrangem muitos peixes de valor comercial como os curimatãs, piau, dourados e pacus. A FIG. 2.38 mostra alguns peixes dessa ordem.

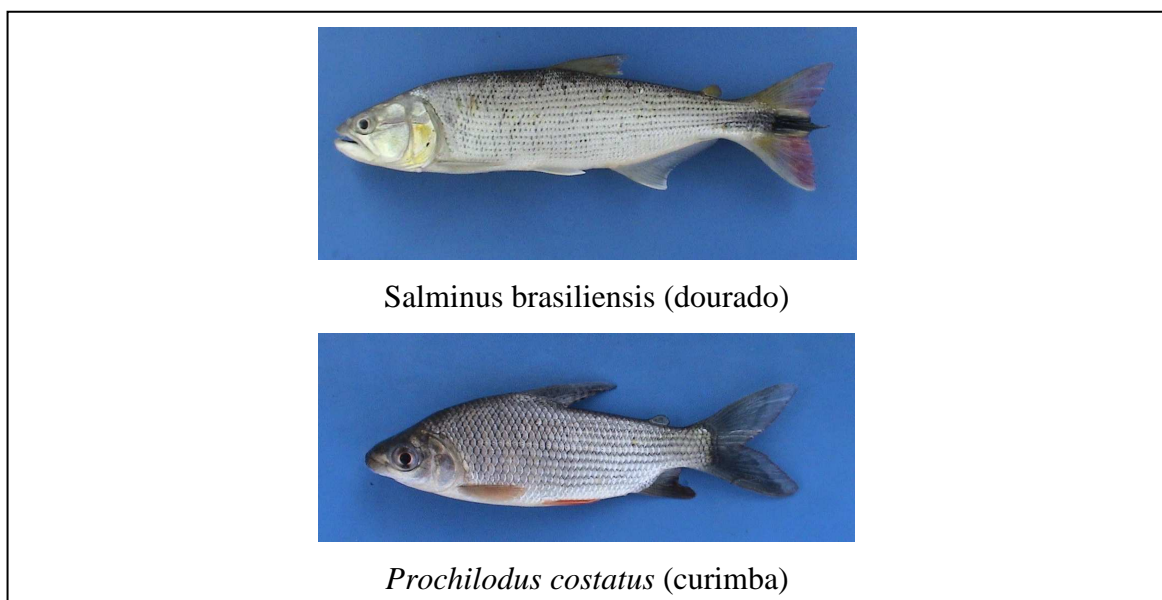


FIGURA 2.38- Espécies de peixes da ordem characiformes

FOTOS: POMPEU

Já os siluriformes são basicamente os chamados peixes de couro ou placas ósseas. Abrangem desde espécies gigantescas, que são capazes de migrar centenas de quilômetros de distância, até espécies bem pequenas. Dentro dessa ordem também se encontram peixes de grande valor comercial como os surubins e os jaús ( FIG. 2.39).

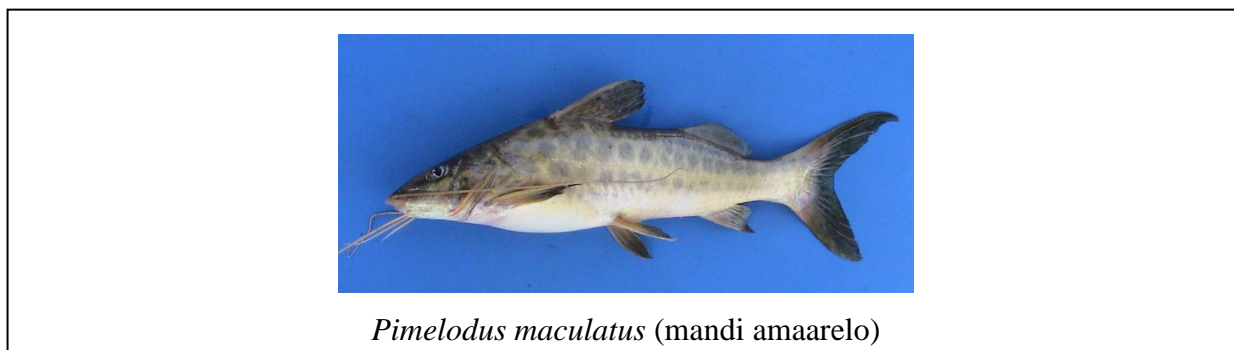


FIGURA 2.39- Espécie de peixe da ordem siluriformes

FONTE: POMPEU





Ainda em relação aos peixes migradores existem espécies estuarinas catádromas, que migram quilômetros rio acima, representadas pelas famílias Centropomidae e Mugilidae, cujos principais integrantes são os robalos e as tainhas, respectivamente.

As ordens dos Perciformes e dos Gymnotiformes apresentam muitas espécies que não migram, estando dentro do primeiro grupo peixes como o tucunaré e as corvinas e no segundo o famoso peixe elétrico. A TAB 2.2 traz as principais famílias presentes nas ordens acima mencionadas.

Diferentemente dos peixes de clima temperado, pouquíssimas espécies tropicais desovam uma vez no seu ciclo vida para então, logo em seguida, morrerem (Lowe-McConnel,1999). Esse comportamento é característico das enguias e dos salmões, e recebe o nome de reprodução *Big bang*. A desova na maioria dos peixes tropicais ocorre em intervalos repetidos sendo os mesmos classificados, de acordo com a maturação dos ovócitos, em desovadores totais ou desovadores múltiplos. Nos primeiros, os ovócitos são produzidos todos em um lote, sendo o mesmo liberado de uma só vez, enquanto que nos desovadores múltiplos ocorre a produção de mais de um lote que são liberados aos poucos. Esse último grupo pode ser dividido ainda em desovadores parciais, nos quais cerca de um terço dos ovócitos matura sendo esses liberados e outros permanecendo armazenados, e em desovadores de pequena prole, que produzem lotes de ovócitos em intervalos mais frequentes. A TAB 2.3 mostra os principais tipos de reprodução (Lowe-McConnel, 1999).

TABELA 2.2

Ordens e famílias das principais espécies de peixes encontradas no Brasil

<b>Ordem Characiformes</b>	<b>Família Prochilodontidae</b>	<b>Família Myleidae ou Serrasalmidae</b>
	• Curimatãs	• Pacus
	<b>Família Anostomidae</b>	• Piranhas
	• Pias	<b>Família Erythrinidae</b>
	• Piaparas	Traíras
	• Timborés	
	<b>Família Characidae</b>	
	• Lambaris	
	• Piabas	
	• Dourados	
	• Matrinchãs	
<b>Ordem Siluriformes</b>	<b>Família Pimelodidae</b>	<b>Família Doradidae</b>
	• Mandis	• Armados
	• Jáus	<b>Família Auchenipteridae</b>
	• Surubins	• Manduvês
	• Bagres	
	<b>Família Loricariidae</b>	
	• Cascudos	
<b>Ordem Perciformes</b>	<b>Família Cichlidae</b>	<b>Família Scianidae</b>
	• Carás	• Corvinas
	• Tucunará	
<b>Ordem Gymnotiformes</b>	<b>Família Gymnotidae</b>	
	• Peixes Elétricos	
	• Sarapós	

FONTE: Adaptado de SATO e GODINHO (1999); GODINHO H., GODINHO A. e VONO (1999); LOWE-MCCONNEL, 1999.

Como mostrado na TAB. 2.3, os peixes de piracema são principalmente desovadores totais sendo dessa forma bastante fecundos. Esse tipo de característica pode ser consequência da evolução desses animais em *habitats* bastante competitivos e em meios adversos como as calhas dos grandes rios em épocas de cheia (Lowe-McConnel, 1999). Porém é de se imaginar que outro caminho poderia ter sido adotado pela natureza: a mudança do período de

reprodução para uma estação em que os rios estivessem menos turbulentos. No entanto é exatamente nesse período de chuvas que ocorrem as enchentes, responsáveis pela comunicação dos rios com as lagoas marginais que constituem locais favoráveis ao crescimento das larvas devido à presença de alimento e a proteção contra predadores. Assim a seleção parece ter feito com que a maioria dos peixes tropicais de rios, entre eles os neotropicais, apresentassem sua fase de reprodução na época do ano com maior taxa de precipitação pluvial.

Outra possível consequência da evolução em *habitats* competitivos é a separação das espécies através de comportamento territorial (Gibson, 1978). Isso sugere que áreas de grande correnteza podem ser preferidas por alguns peixes enquanto que, para outras espécies, podem representar uma barreira de velocidade (Peake, 2004). No caso dos peixes neotropicais, a variedade de ambientes existentes nos rios, criou uma grande especialização das espécies quanto ao tipo de locomoção e de velocidade utilizadas na natação. Esse fato pode ser visualizado pelo próprio formato do peixe. Espécies típicas de corredeira apresentam o corpo mais alongado e achatado, sendo principalmente de fundo como os cascudos. Peixes mais lentos apresentam a seção transversal do corpo mais circular.

Todas essas características da ictiofauna neotropical mostram sua riqueza e diversidade, bem como os desafios no dimensionamento de MTP que devem, na maioria das vezes e de forma economicamente viável, atender as exigências de várias espécies de peixes.

TABELA 2.3  
Tipos de reprodução em peixes tropicais de água doce

Tipo de Fecundidade	Sazonalidade na reprodução	Exemplos	Movimentos e cuidado parental		
Big bang	Uma vez na vida	Anguilla	Migrações muito longas, catádromos sem cuidado parental		
Desovadores totais	Muitos sazonais com enchentes: anual ou bianual	Muitos caracóides: Ex: <i>Prochilodus</i> <i>Salminus</i>	Peixes de “piracema” com migrações longas. Sem cuidado parental.		
		Hydrocynus			
Desovadores parciais	Estação prolongada Durante estação (s) de águas altas	Muitos ciprinídeos			
		Alguns siluróides <i>Lates</i> (Lago Chade)	Movimentos locais: ovos pelágicos		
Desovadores de pequenas ninhadas	Estação das águas altas; pode começar no fim da estação seca ou ser não-sazonal	Alguns ciprinídeos	Principalmente movimentos locais		
		Alguns caracóides: Ex: <i>Serrasalmus</i> <i>Hoplias</i>	Guarda ovos em plantas (m; m+f) Guarda ovos no fundo(m)		
		Alguns siluróides: Ex: <i>Mystus</i>	Guarda ovos e jovens(m)		
Desovadores de pequenas ninhadas	Estação das águas altas; pode começar no fim da estação seca ou ser não-sazonal	Arapaima	Guarda ovos e jovens; ninhos no fundo(m+f)		
		Alguns anabantóides <i>Hoplosternum</i> <i>Hypostomus</i> <i>Loricaria parva</i> <i>Loricaria spp.</i> <i>Aspredo sp.</i> <i>Osteoglossum</i>	Guardam ovos, ninho de bolhas superficial(m) Guarda ovos em ninhos de superfície (m) Guarda ovos; buracos das margens (sexo?) Guarda ovos sob pedras (m) Carrega ovos no lábio inferior (m) Carrega ovos no ventre (f) Prole na boca (m)		
		Ciclídeos: -Maior parte das espécies sul-americanas	Guardam ovos e jovens (m+f)		
		-Maior parte das espécies africanas <i>Sarotherodon galilaeus</i> <i>S. melanotheron</i>	Prole na boca ovos e jovens (f) Prole na boca ovos e jovens (m+f)		
		Raias de ferrão <sup>b</sup> Pecilídeos	Prole na boca ovos e jovens (m) Vivíparas		
		Anableps	Vivíparas Vivípara		
		Fim das chuvas	Espécies de ciprinodontes anuais	Deixam os ovos no lodo durante a estação seca	
		m=macho	f=fêmea	<sup>a</sup> =fim da estação seca	<sup>b</sup> = ou é não sazonal

FONTE- LOWE-MCCONNEL, 1999. p. 252

## **2.2 Funcionamento e dimensionamento das escadas do tipo slot vertical**

### **2.2.1. Dimensionamento das escadas do tipo slot vertical**

Como qualquer canal, as escadas do tipo *slot* vertical têm seu dimensionamento dependente das variáveis hidráulicas rugosidade, inclinação e área transversal. No entanto, sendo o objetivo das escadas possibilitar a passagem dos peixes, a vazão a ser escoada pela mesma é uma consequência da adequação dessas variáveis hidráulicas às necessidades destes últimos.

Por trás da classificação *slot* vertical existem várias configurações de escadas (TAB. 2.4) cujo tipo de circulação imposto ao fluido faz com que as vazões sejam diferentes.

Apesar dessa diferenciação, todos os modelos do tipo *slot* vertical se caracterizam por possuir áreas de descanso, também chamadas piscinas, e áreas com fluxo mais rápido, na qual o peixe estará efetivamente realizando sua migração.

O processo de dimensionamento de uma escada do tipo slot vertical inicia-se com a definição de três variáveis hidráulicas: abertura da ranhura ( $b_o$ ), altura da lâmina d'água ( $y_o$ ) e inclinação da escada ( $S_o$ ), sendo os dois primeiros relacionados às características da ictiofauna e o último relacionado às características do obstáculo a ser transposto.

A abertura  $b_o$  é local onde ocorre a passagem do escoamento dentro da escada e seu valor é determinado pela largura máxima da maior espécie de peixe que utilizará o dispositivo (FIG. 2.40). As dimensões das piscinas ( $L$  e  $B$ ) influenciam diretamente a dissipação de energia do escoamento. Assim, alguns autores aconselham determinados valores, que muitas vezes são expressos em função de  $b_o$ , de forma a obter um comportamento mais eficiente da escada (TAB. 2.4).

Já a inclinação das escadas  $S_o$  (FIG. 2.41) é determinada pelo arranjo do impedimento a ser transposto. No entanto, devido à influência desse parâmetro na velocidade do escoamento, que por sua vez deve ser compatível com a do peixe, é aconselhado que a inclinação não seja muito alta. Na TAB. 2.5 são mostrados os valores indicados por diversos autores.



**TABELA 2.4**  
**Modelos de escadas do tipo slot vertical (Rajaratnam, Van der Vinne e Katopodis, 1986)**

	$Q_* = 3,77 \left( \frac{y_o}{b_o} \right) - 1,11$		$Q_* = 2,71 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 2,98 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$
	$Q_* = 3,75 \left( \frac{y_o}{b_o} \right) - 3,52$		$Q_* = 2,91 \left( \frac{y_o}{b_o} \right) - 3,22$		$Q_* = 3,21 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$
	$Q_* = 2,84 \left( \frac{y_o}{b_o} \right) - 1,62$		$Q_* = 1,66 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 2,89 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$
	$Q_* = 5,85 \left( \frac{y_o}{b_o} \right) + 0,67$		$Q_* = 1,4 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 3,59 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$
	$Q_* = 2,67 \left( \frac{y_o}{b_o} \right) - 0,52$		$Q_* = 1,65 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 3,27 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$
	$Q_* = 3,11 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 4,13 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 3,71 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$

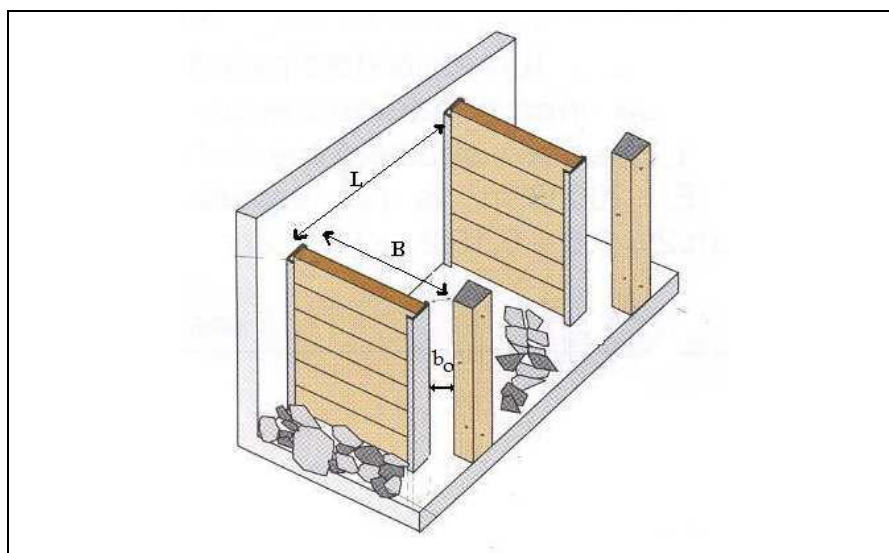


FIGURA 2.40- Variáveis hidráulicas das escadas do tipo slot vertical

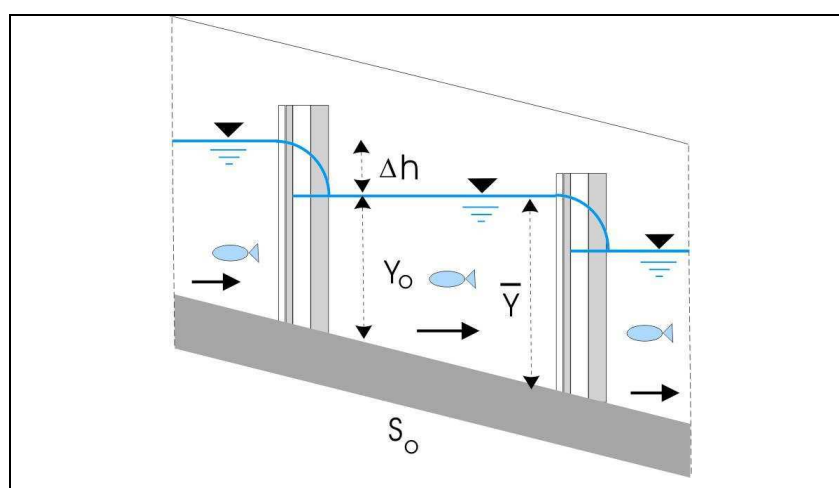


FIGURA 2.41- Corte longitudinal na escada do tipo slot vertical

TABELA 2.5

Valores de inclinação indicados

Inclinação (%)	Autor
10	Katopodis (1992)
10-15	Larinier (2002)

Por fim, a última variável hidráulica a ser definida é a profundidade mínima  $y_0$ . Dependendo do comportamento natatório na coluna d'água, ou seja, se o peixe nada no meio da coluna ou no fundo, determina-se a profundidade necessária dentro da escada. Na literatura é possível encontrar uma convenção de profundidades mínimas para peixes de clima temperado (TAB 2.6).

TABELA 2.6

Valores de profundidade mínima (m) para espécies de clima temperado

Grayling, bream, chub, outros		Esturjão
Truta marrom	Salmão, huchen e trutas	
0,50	0,75	1,30

Fonte: Gebler, 1991 e Larinier, 1992<sup>a</sup>

De posse destas três variáveis é possível calcular a vazão que irá passar pela escada. Através das equações fornecidas pela TAB. 2.4, obtém-se  $Q_*$  e conseqüentemente a vazão total (EQ. 2.8).

$$Q = Q_* \sqrt{g S_o b_o^5} \quad \text{EQ. 2.8}$$

A etapa seguinte do dimensionamento consiste em analisar o atendimento da escada à dois critérios: o da velocidade máxima e o da dissipação máxima. Ambos os critérios são determinados pelas características da ictiofauna local.

A velocidade máxima da escada não pode ultrapassar a velocidade do peixe que irá utilizar o mecanismo. Para isso, é feita uma verificação, a cada slot, do atendimento a esse critério, através do cálculo do desnível físico  $\Delta h$ . Este último está relacionado à velocidade máxima como mostra a EQ. 2.9.

$$\Delta h = \frac{V_{\max}^2}{2g} \quad \text{EQ. 2.9}$$

Por fim, a escada deve ser analisada quanto à adequação da dissipação de energia (EQ. 2.10) aos valores de turbulência suportados pelos peixes. Com a falta desses valores para espécies neotropicais, vêm sendo praxe no Brasil adotar o limite de  $0,191 \text{KW/m}^3$  (Bell, 1973), proposto para espécies de clima temperado.

$$\kappa = \frac{Q \gamma \Delta h}{B L y_o} \quad \text{EQ. 2.10}$$

Uma outra verificação da dissipação de energia é feita por meio da análise do coeficiente de descarga (EQ. 2.11), que deve estar entre 0,6 e 0,7 (Rajaratnam, Van der Vinne e Katopodis, 1986).

$$Q = C_d (b_o \bar{y}) \sqrt{2g\Delta h} \quad \text{EQ. 2.11}$$

O dimensionamento de qualquer escada de peixes se caracteriza por ser um processo recursivo, onde o não atendimento de um dos critérios de velocidade e de dissipação máxima determina uma alteração em uma das três variáveis iniciais: abertura da ranhura ( $b_o$ ), altura da lâmina d'água ( $y_o$ ) ou inclinação da escada ( $S_o$ ). A FIG. 2.42 sistematiza o processo de dimensionamento de uma escada do tipo slot vertical.

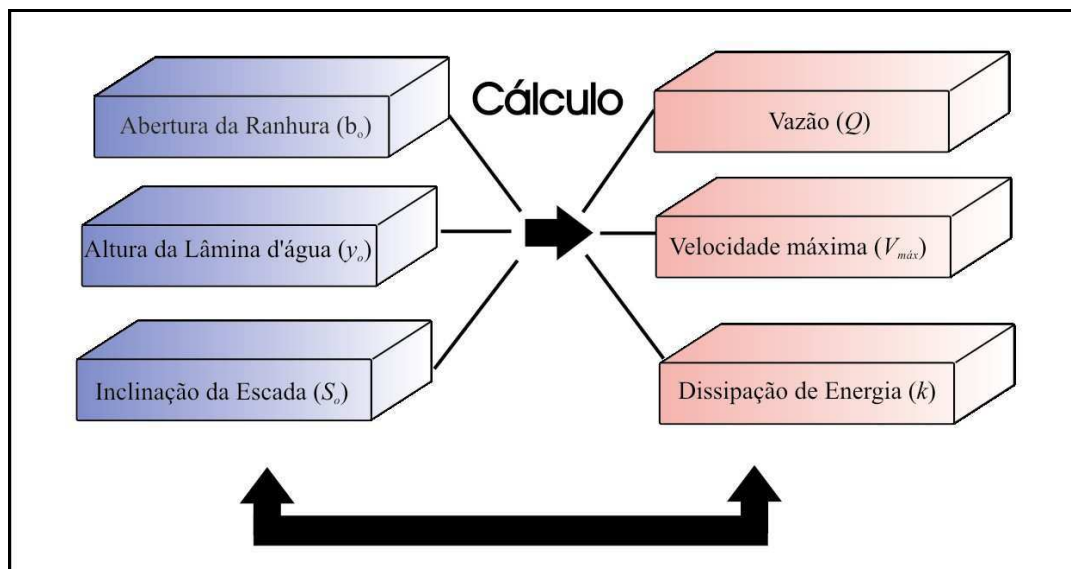


FIGURA 2.42- Fluxograma do dimensionamento de uma escada do tipo slot vertical

### 2.2.2. Uso de parâmetros natatórios em critérios de dimensionamento de escadas de peixes

Como mostrado anteriormente, o dimensionamento de uma escada para peixes consiste na adequação hidráulica de um canal às características biológicas da ictiofauna local. Entre estas características está a chamada capacidade natatória dos peixes cujo valor condiciona principalmente as escadas, visto que nestas a transposição do desnível é realizada pelo peixe através do seu esforço natatório.

No entanto, a capacidade natatória de um peixe pode ser classificada de forma variada de acordo com a velocidade apresentada pelo mesmo. Dessa forma, durante o processo de dimensionamento de uma escada, qual velocidade de natação adotar? Dentro do perfil de velocidades das escadas, qual delas utilizar como fator limitante mediante a sua igualdade com a velocidade do peixe? Vários pesquisadores, desde biólogos a engenheiros, propuseram metodologias de forma a adequar escadas e bueiros (*culverts*) às necessidades da ictiofauna, com base nos diferentes tipos de velocidades natatória já descritos neste capítulo.

A chamada velocidade prolongada crítica foi utilizada como critério para determinação da velocidade da água em escadas e bueiros (*culverts*), por Jones, Kiceniuk e Bamford (1974) e posteriormente analisada por Peake (2004). O procedimento iniciava-se com determinação da velocidade crítica para um certo comprimento do peixe. Supondo que seu valor era de 50 cm/s, e o mesmo foi obtido em testes cujo incremento de tempo era igual a 10 minutos, caso a escada a ser construída tivesse 50 metros de comprimento, o peixe deveria percorrê-la num tempo de 10 minutos (ou 600 segundos). Assim, a velocidade total (em relação a um referencial parado) que o peixe deveria desenvolver seria de 8,3 cm/s (50 metros / 600 segundos). Subtraindo da velocidade crítica o valor encontrado (50 cm/s – 8,3 cm/s), chegaria-se a velocidade máxima do canal (41,7 cm/s).

É importante salientar que neste critério, o intervalo de tempo escolhido para determinação da velocidade crítica deve ser próximo ao tempo real que um peixe levaria para percorrer a escada ou o *culvert* a ser dimensionado.

A determinação da velocidade máxima do escoamento com base na velocidade crítica do peixe ainda é utilizada no dimensionamento de muitos MTP. Entretanto, a suspeita da subestimação da capacidade natatória medida em túneis hidrodinâmicos levou pesquisadores como Peake a reavaliar tal procedimento.

Assim, para essa análise, Peake mediu a velocidade crítica do *smallmouth bass* em um túnel e quantificou a subida desses mesmos peixes em um canal de 50 metros de comprimento e 4 metros de desnível, medindo a porcentagem de subidas com sucesso para escoamentos com velocidades máximas diferentes. Além disso, as velocidades absolutas dos peixes (somada à velocidade da água) também foram medidas.

Supondo que o peixe nadasse com a velocidade crítica, medida anteriormente, (78 e 91 cm/s, para o menor e maior peixe testado respectivamente), a velocidade máxima de projeto deveria ser 54 cm/s e 63 cm/s segundo a metodologia de Jones, Kiceniuk e Bamford (1974), para os extremos comprimentos testados (FIG. 2.43). No entanto, quando se analisa a porcentagem de subidas com sucesso, 80% dos peixes, testados no escoamento com velocidade máxima igual a 120 cm/s, conseguem fazer a transposição do canal (FIG. 2.44).

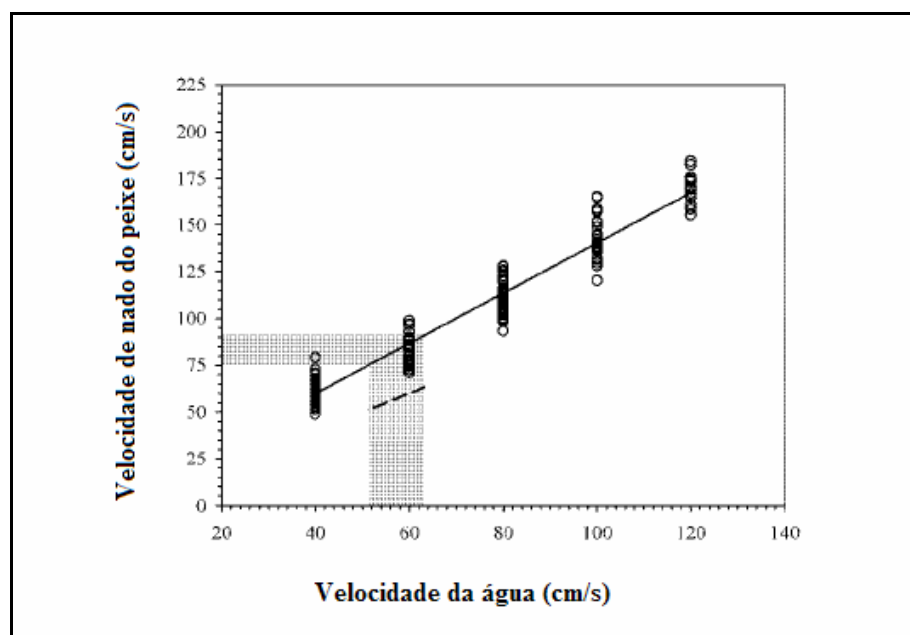


FIGURA 2.43- Equação linear da velocidade de nado do peixe em função da velocidade máxima do escoamento.

FONTE: PEAKE, 2004. p. 1476

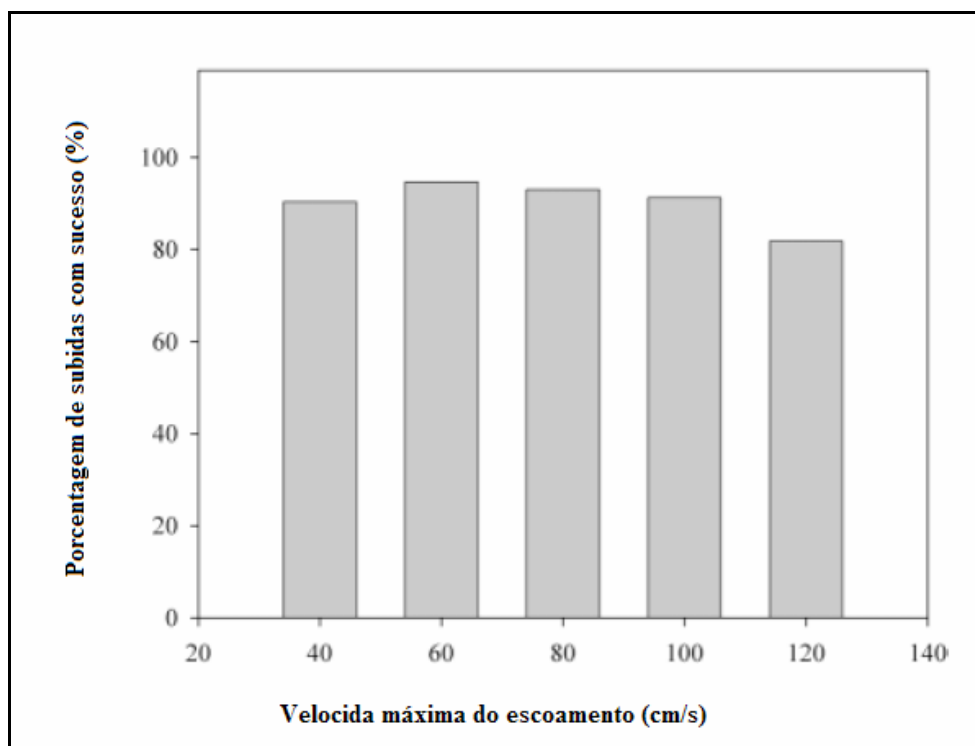


FIGURA 2.44- Proporção de subidas com sucesso para vários escoamentos

FONTE: PEAKE, 2004. p. 1476

Dessa forma, Peake demonstrou que o uso da velocidade crítica no dimensionamento de MTP é um critério de projeto bastante conservativo.

Assim, para projetos de grandes MTP são necessários critérios menos conservativos, uma vez que o custo construtivo dos mesmos aumenta com o tamanho e com a subestimação da velocidade do peixe. Além disso, é de fundamental importância que sejam avaliadas as condições comportamentais e fisiológicas para a determinação da máxima velocidade do escoamento dentro do MTP.

De certa maneira, estas condições são levadas em consideração no critério descrito por Katopodis em 1992. Nele, além das velocidades de nado, os tempos de fadigas obtidos em laboratórios para as mesmas também são usados na obtenção da velocidade do fluxo.

Como será explicado no próximo capítulo, existem várias formas de se determinar o tempo de fadiga dos diversos tipos de velocidade de peixe. No caso da chamada velocidade prolongada, o peixe é forçado a nadar em um escoamento com velocidade fixa e o tempo de permanência (indicado pela sua fadiga), neste escoamento, é marcado. Assim, o segundo critério inicia-se

com a adimensionalização dos parâmetros velocidade de nado (velocidade fixa),  $U$ , e tempo de fadiga,  $t$ , cujos símbolos se tornam  $F_f$  e  $t_*$  respectivamente. Ambos parâmetros devem se relacionar pela EQ. 2.12:

$$F_f = kt_*^{-\eta} \quad \text{EQ. 2.12}$$

onde  $k$  e  $\eta$  são constantes. Construindo-se um gráfico com equação acima se chega a FIG. 2.45.

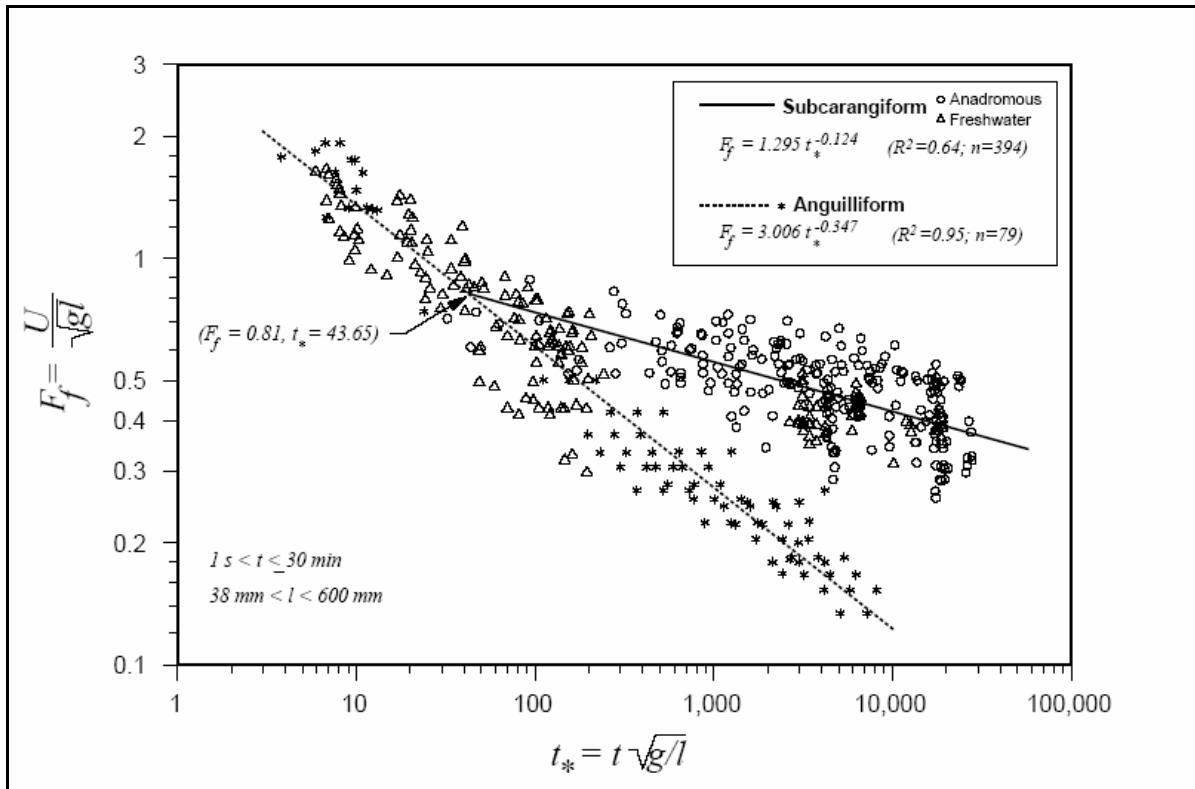


FIGURA 2.45 - Gráfico de  $F_f$  x  $t_*$  para o grupo dos nadadores subcarangiformes (prolongada e explosão) e anguiliformes (prolongada).

FONTE: KATOPODIS, 1992. p. 35

Assim, como o objetivo é encontrar, a partir das velocidades dos peixes, a velocidade do escoamento, a próxima etapa da metodologia é transformar a relação da EQ. 2.12 na relação entre a velocidade do fluxo e a distância percorrida pelo peixe. Essa última por sua vez pode ser equacionada da seguinte forma:

$$X = (U - V)t \quad \text{EQ. 2.13}$$



onde  $X$  é a distância percorrida pelo peixe com velocidade total média  $U$  em um escoamento de velocidade  $V$  e em um tempo  $t$ .

Substituindo a EQ. 2.13 na EQ. 2.12 e maximizando  $X$ , chega-se a igualdade abaixo:

$$\varepsilon = CF^{-\lambda} \quad \text{EQ. 2.14}$$

onde  $\varepsilon = \frac{X_{\max}}{l}$  ;  $F = \frac{V}{\sqrt{gl}}$  ;  $\lambda = \frac{(1-\eta)}{\eta}$  ;  $C = \eta(1-\eta)^\lambda K^{1/\eta}$ .

Assim, fazendo o gráfico da EQ. 2.14 para os mesmos peixes mostrados na FIG. 2.45, obtém-se a FIG. 2.46.

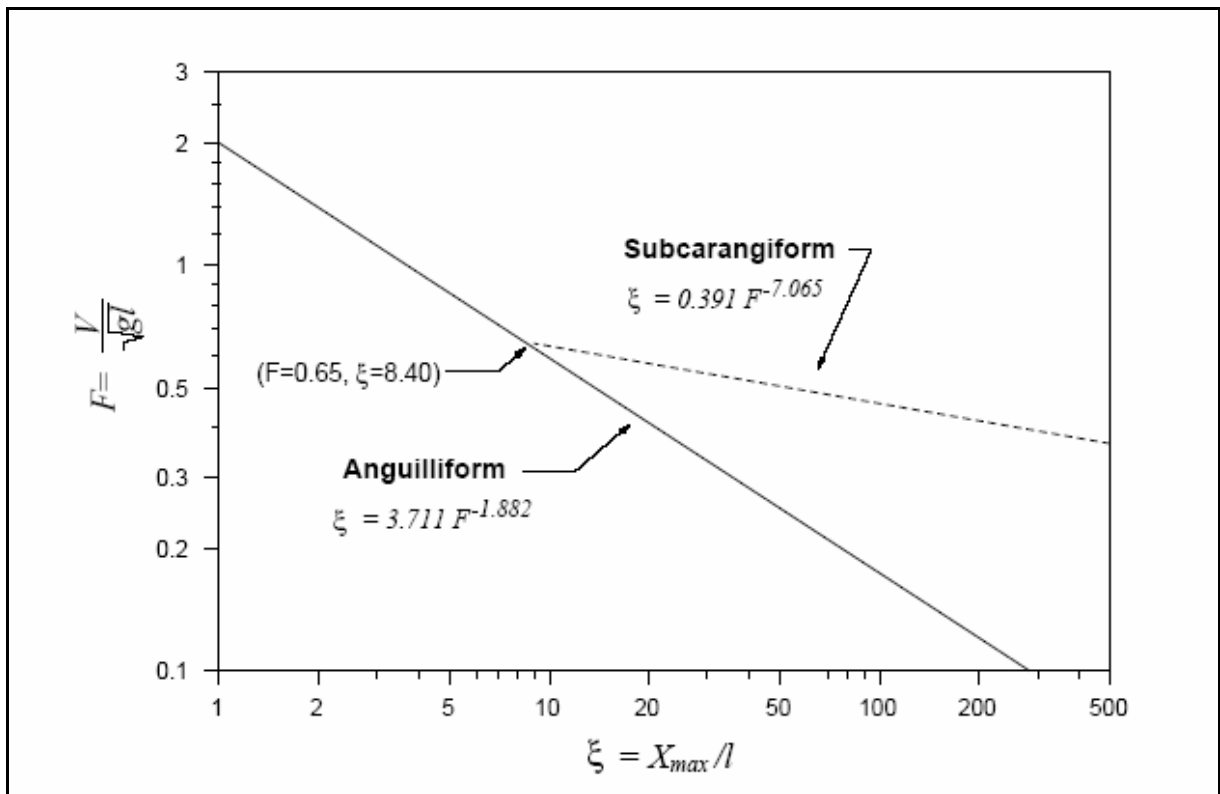


FIGURA 2.46 – Gráfico de  $F \times \varepsilon$  para o grupo dos nadadores subcarangiformes (prolongada e explosão) e anguiliformes (prolongada).

FONTE: KATOPODIS, 1992. p. 37

Assumindo valores para o comprimento dos peixes, obtém-se finalmente a relação entre a velocidade da água e a distância a ser percorrida pela espécie no MTP (FIG. 2.47).

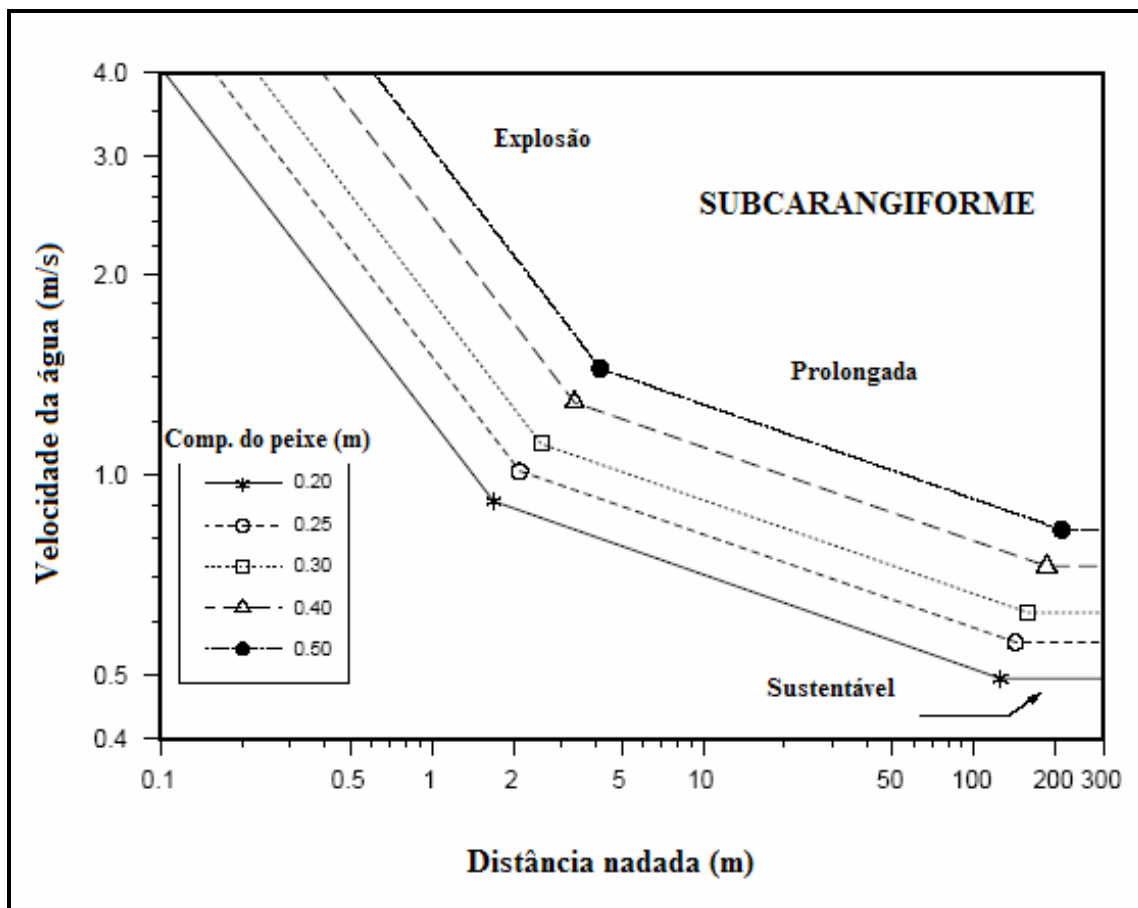


FIGURA 2.47 – Gráfico da velocidade do escoamento x distância para o grupo dos nadadores subcarangiformes.

FONTE: KATOPODIS, 1992. p. 38

Portanto, a partir do comprimento da escada e do peixe, chega-se à velocidade do escoamento. No entanto, é importante salientar que neste tipo de análise o peixe deve manter a velocidade constante ao longo do percurso. Assim, segundo este critério, o uso da velocidade de explosão só ocorre em escadas muito curtas e quanto maior seu comprimento, menor deverá ser a velocidade de seu fluxo. No entanto, é praticamente impossível garantir que o peixe usará somente uma velocidade de nado durante seu percurso.

Dessa forma, foi proposto um terceiro critério, que supõe o uso da velocidade de explosão caso o peixe precise vencer a velocidade máxima do escoamento. Essa última nunca poderia ultrapassar a máxima velocidade de explosão (Blake, 1983). Segundo Rajaratnam, Katopodis e Solanki (1991), com a velocidade máxima calcula-se a máxima dissipação de energia em

cada ranhura da escada, que nunca deve ultrapassar  $0,191 \text{ kW/m}^3$ . Caso isso ocorra, a inclinação deve ser diminuída para redução da velocidade máxima.

A dificuldade deste último critério está na escolha da velocidade de explosão máxima. Mundialmente, adotam-se as velocidades sugeridas por Gebler em 1991:

- 2 m/s para salmonídeos (trutas e salmões);
- 1,5 m/s para ciprinídeos (carpas);
- 1,0 m/s para peixes pequenos e jovens.

No entanto, estes valores são bastante genéricos e não abrangem a grande parte das espécies neotropicais.

Assim, várias são as metodologias para dimensionamento de escadas para peixe. No entanto, a complexidade do tema, que envolve a combinação de conhecimentos comportamentais, fisiológicos e hidráulicos, e as falhas mostradas nos critérios descritos acima mostram a necessidade de estudos para novas predições de velocidade do escoamento (Peake, 2004), em especial, para o conjunto da fauna de peixes neotropical.

### **2.2.3. Simulação numérica do escoamento dentro de canais livres**

A aplicação da conservação da massa, da quantidade de movimento linear e angular e energia no escoamento de fluidos gera equações diferenciais sem solução exata.

Uma das formas de resolvê-las é através da aplicação de métodos numéricos que permite a obtenção de soluções aproximadas para o escoamento de fluidos. Assim, o uso de computadores para este tipo de aplicação recebeu o nome de CFD, *Computational fluid dynamics*.

Entre os métodos numéricos mais aplicados à dinâmica de fluidos está o método das diferenças finitas e dos elementos finitos. A idéia básica do primeiro consiste na aproximação das derivadas parciais de uma equação diferencial através de fórmulas de diferenças, e satisfação dessa equação aproximada de diferenças em determinados pontos. A partir da série de Taylor chega-se a esta diferença

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad \text{EQ .2.15}$$

No caso da aplicação de métodos numéricos em escoamentos abertos, ou seja, em escoamentos onde a pressão atmosférica atua diretamente no fluido, a determinação da linha de interação água e ar é uma dificuldade adicional à solução computacional.

Para tratar dos casos de escoamentos livres, algumas aproximações numéricas foram propostas (Flow Science, 2007): método de Lagrange, método da altura d'água, Marker-and-Cell (MAC), Surface Marker e Volume-of-Fluid (VOF).

O método MAC é baseado na análise do fluido através de uma malha euleriana. A localização do fluido dentro desta malha é determinada por conjunto de partículas marcadas que se movem, mas não possuem volume, massa nem outras propriedades. As células da malha que contem as partículas marcadas são consideradas ocupadas. A superfície livre é definida por células ocupadas que tenham pelo menos uma célula vazia na vizinhança. A evolução da lâmina d'água no tempo é feita através da interpolação local das velocidades do fluido (Flow Science, 2007).

Um dos problemas do método anterior é a sua grande exigência de memória computacional. Assim, desenvolveu-se o método Surface Marker que marca apenas as partículas da superfície e não de todo fluido em questão (Flow Science, 2007).

O método mais recente é o VOF que consiste em armazenar dentro de cada célula, da malha representativa do fluido, informações sobre determinadas quantidades de escoamento (pressão, velocidade e temperatura). Dessa maneira, por conter mais informações nas células que os outros métodos, apenas as localizadas na superfície livre são armazenadas (Flow Science, 2007).

Assim, muitos softwares comerciais do tipo CFD vêm sendo desenvolvidos. Para estudar os campos preferenciais dentro de uma escada do tipo slot vertical, optou-se então por utilizar o Flow3D da Flow Science.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Testes de capacidade natatória

Este capítulo tem como objetivo detalhar a metodologia empregada na determinação da velocidade crítica e prolongada para algumas das principais espécies neotropicais.

Assim, essa seção tem por objetivo esclarecer os procedimentos experimentais adotados, bem como as correções utilizadas na compensação de efeitos sobre a natação e na análise de incerteza. Além disso, discutem-se as ferramentas estatísticas empregadas na organização dos dados obtidos.

#### 3.1.1. Espécies escolhidas

Como explicado anteriormente, a América do Sul apresenta uma grande diversidade de peixes de água doce e devido à sua história biogeográfica, boa parte dos gêneros das espécies migradoras está distribuída pelas principais bacias do continente. Assim foram escolhidas algumas espécies cujos gêneros se encontram bem distribuídos pelos rios sul-americanos, ou seja, gêneros que possuem pelo menos uma espécie em praticamente todas as bacias Sul-Americanas.

Dentro desses gêneros optou-se por escolher as espécies presentes na bacia do São Francisco. Essa escolha se deve à proximidade dos afluentes desse rio à cidade de Belo Horizonte, local onde os testes estão sendo realizados, e à existência de estudos para construção de MTP em barragens localizadas em alguns desses afluentes. Dessa forma foram escolhidas 1 espécie da Ordem Siluriforme: *Pimelodus maculatus* (mandi-amarelo) e 2 da Ordem Characiforme: *Prochilodus costatus* (curimatá ou curimba) e *Leporinus reinhardti* (piauí-três-pintas) (TAB. 3.1). Esta duas Ordens apresentam o maior número de espécies de migradoras do ambiente Neotropical.

TABELA 3.1

Espécies escolhidas para estudos




	<p><b>Espécie:</b> <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi)</p> <p><b>Família:</b> Pimelodidae</p> <p><b>Distribuição:</b> Bacias do Prata e do São Francisco</p>
	<p><b>Espécie:</b> <i>Leporinus reinhardti</i> (piauí)</p> <p><b>Família:</b> Anostomidae</p> <p><b>Distribuição:</b> Bacia do rio São Francisco</p>
	<p><b>Espécie:</b> <i>Prochilodus costatus</i>. (curimbatá)</p> <p><b>Família:</b> Prochilodontidae</p> <p><b>Distribuição:</b> Bacia do rio São Francisco</p>

FOTO: POMPEU

### 3.1.2. Coleta e Manutenção

Todos os indivíduos das espécies *Pimelodus maculatus* (mandi) e *Leporinus reinhardti* (piauí) foram coletados diretamente do rio São Francisco na proximidade da UHE de Três Marias. O transporte desses peixes durou em média 4 horas, sendo os mesmos capturados por pescadores da região em 1 ou 2 dias anteriores ao da viagem. Assim, até a chegada da equipe de campo, os indivíduos eram mantidos no rio em uma gaiola feita de tela de plástico.

Já os indivíduos da espécie *Prochilodus costatus* foram capturados rio Paraopeba, afluente do São Francisco, nas proximidades da UHE de Igarapé. Como a distância da usina até Belo Horizonte é pequena, o transporte durava em média 1,5 horas, sendo os peixes coletados por tarafa assim que a equipe técnica chegava.

Como os processos de captura e transporte causam estresse ao animal, foi necessária a adoção de algumas medidas, já que dessa forma o peixe estaria mais susceptível à doenças causadas por fungos e bactérias. A primeira dessas medidas é a adição de sal à água na qual o peixe é

transportado, a uma concentração de 1%. Para esse transporte foi utilizado o container mostrado na FIG. 3.1. Fez-se aeração da água durante a viagem por meio 4 bombas de aquário, alimentadas por uma fonte (*no-break*) carregada previamente.



FIGURA 3.1- *Container* para transporte dos peixes

Após a chegada dos peixes no laboratório, a dessalinização da água era feita vagarosamente por diluição. Em seguida submeteu-se os peixes a um banho de 15 a 20 minutos em Terramicina (antibiótico) a uma concentração de  $20 \text{ mg/m}^3$ , realizado em uma caixa d'água separada do sistema de manutenção no qual os peixes foram posteriormente colocados. Durante esse processo, um cuidado especial foi tomado com relação a temperatura, procurando-se mantê-la igual tanto na caixa com Terramicina quanto no sistema de manutenção.

Dependendo da espécie, os indivíduos foram mantidos em aquários, no caso dos piaus (FIG. 3.2), ou em caixas, no caso dos mandis. Os peixes testados sempre foram separados dos não testados.

Logo após a chegada dos peixes ao laboratório, os mesmos permaneciam por 24 horas nos sistemas de manutenção, cuja temperatura situou-se em torno de  $27$  a  $29^\circ\text{C}$ , antes se realizar o primeiro teste com um dos indivíduos recém capturados.

Em geral, o tempo máximo que os peixes podiam permanecer no laboratório antes serem testados variava em torno de 7 a 15 dias. Após esse período, a manutenção dos mesmos em água parada torna-os menos capazes de desenvolver sua real capacidade natatória.



FIGURA 3.2- Aquário de manutenção dos piaus.

Assim, os mesmos ou foram devolvidos para o rio ou mantidos em laboratório para outros testes que não envolviam capacidade natatória.

### **3.1.3. Aparato Experimental**

Para a realização de estudo de capacidade natatória, dentre os aparatos experimentais descritos no capítulo 2, optou-se por utilizar o respirômetro de Brett, equipamento amplamente adotado em estudos dessa natureza.

Foram construídos dois túneis hidrodinâmicos, um com diâmetro nominal de 150 mm e outro de 250 mm. O primeiro possibilita o estudo de indivíduos com pequeno porte, enquanto o segundo, além de permitir o estudo de peixes maiores, foi desenvolvido para realizar também testes em campo.

#### **3.1.3.1. Túnel Hidrodinâmico com diâmetro nominal de 150 mm**

O primeiro aparato, construído para o presente trabalho e utilizado no levantamento da capacidade natatória do piaú e do mandi, trata de um túnel hidrodinâmico alimentado por duas bombas centrífugas com baixa altura de recalque. Possuindo seção transversal circular, o túnel tem seu funcionamento como conduto forçado. Um esquema geral deste aparato é apresentado na FIG. 3.3.



O sentido do escoamento, indicado na FIG. 3.3 com uma seta, é determinado pelas bombas que, succionando de forma afogada uma caixa de 5000 litros, recalcam uma vazão de até 0,042 m<sup>3</sup>/s para o respirômetro.

A ligação entre as bombas e o túnel é feita por meio de tubulação flexível (mangote) de 101,6mm (4”) e de a uma conexão do tipo Y, feita de fibra de vidro e PVC. A partir dessa conexão inicia-se a tubulação rígida que é constituída por três trechos. O primeiro é feito em PVC e possui 150mm (6”) de diâmetro interno e 3500 de extensão (23 diâmetros a montante da seção de teste). O segundo trecho é a seção de teste em acrílico, com diâmetro interno de 144 mm, espessura da parede de 4mm e comprimento de 1120 mm. A seção final possui um diâmetro interno de 150 mm (6”), extensão de 2300 mm (15 diâmetros a jusante da seção de teste) e também é feita em PVC (FIG. 3.3). Nessa última seção encontra-se acoplado o medidor eletromagnético de vazão (FIG. 3.4).

Os trechos a jusante e a montante da seção de testes operam como redutores de interferência tanto da bomba como do registro gaveta (R3) posicionado na saída do sistema.

Além do tubo de acrílico, a seção de teste também possui, acoplada a essa tubulação, conexões de PVC do tipo Tê nas duas extremidades (FIG. 3.5), que servem para entrada e retirada do peixe a serem ensaiados. O trecho em acrílico permite a visualização do animal, que é confinado na mesma através de telas colocadas entre as conexões Tê e os tubos de PVC (FIG. 3.5 e FIG. 3.6). O esquema da FIG. 3.7 indica as dimensões da tubulação rígida.

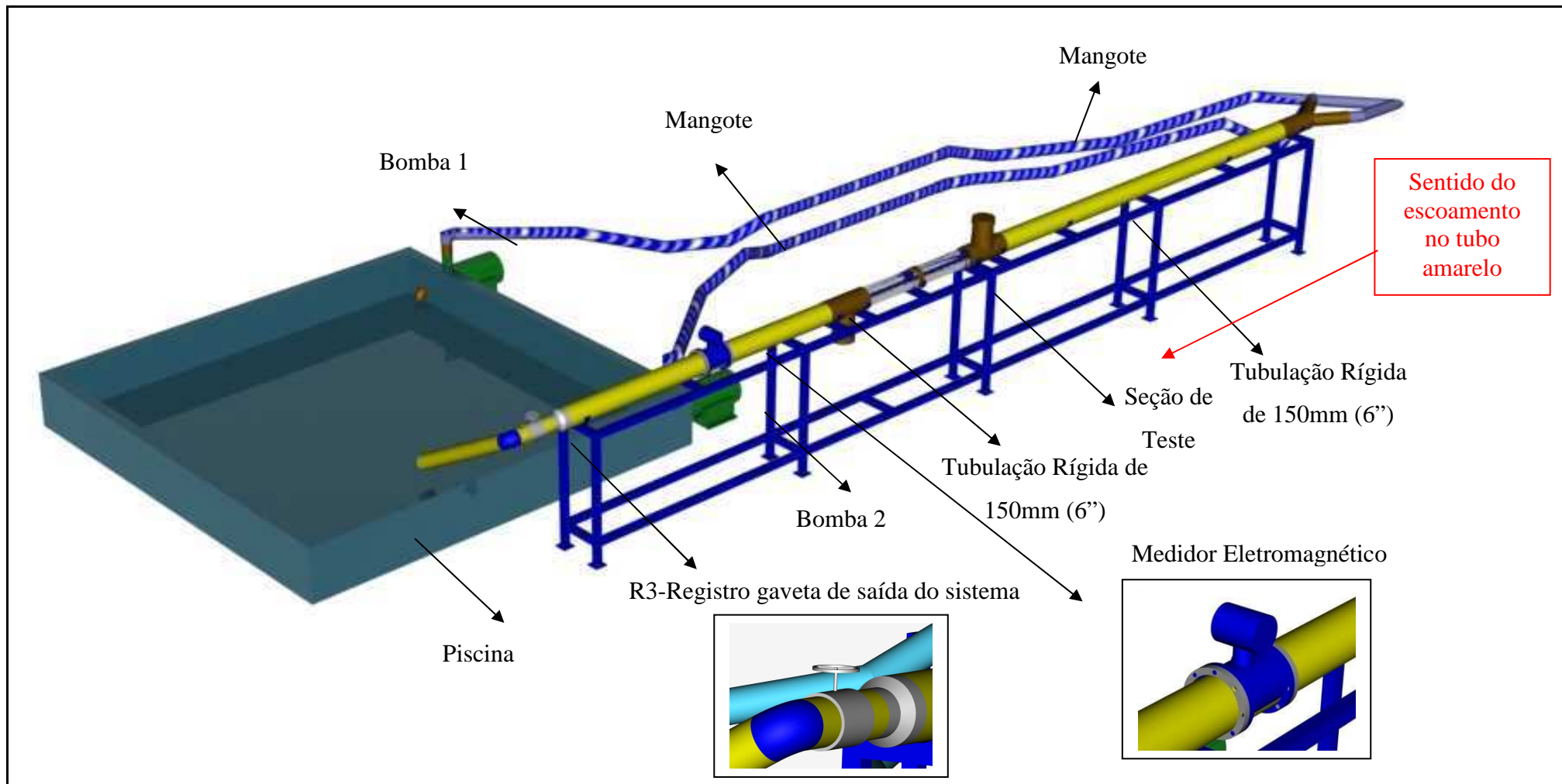


FIGURA 3.3-Esquema do aparato de DN 150 mm

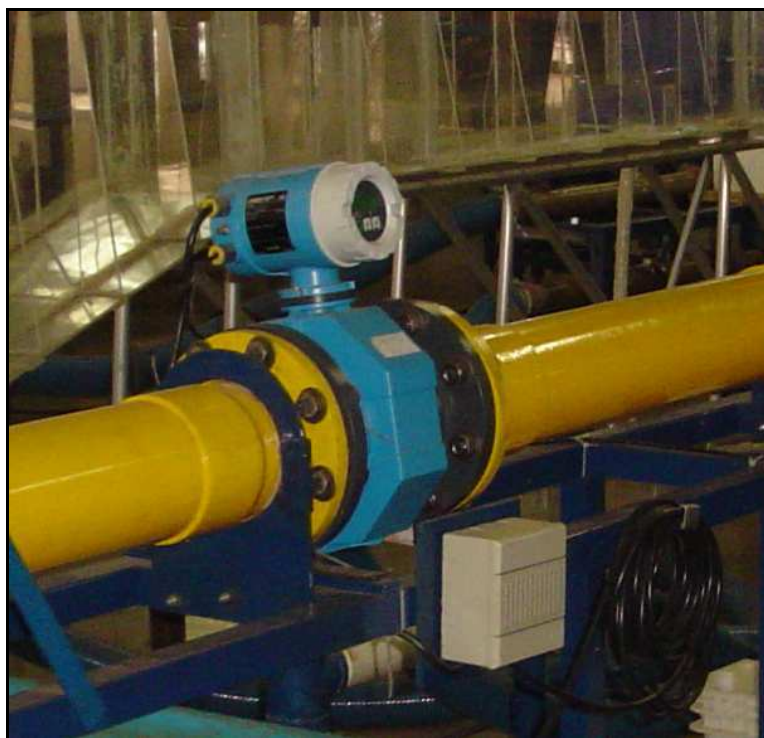


FIGURA 3.4- Medidor de vazão eletromagnético

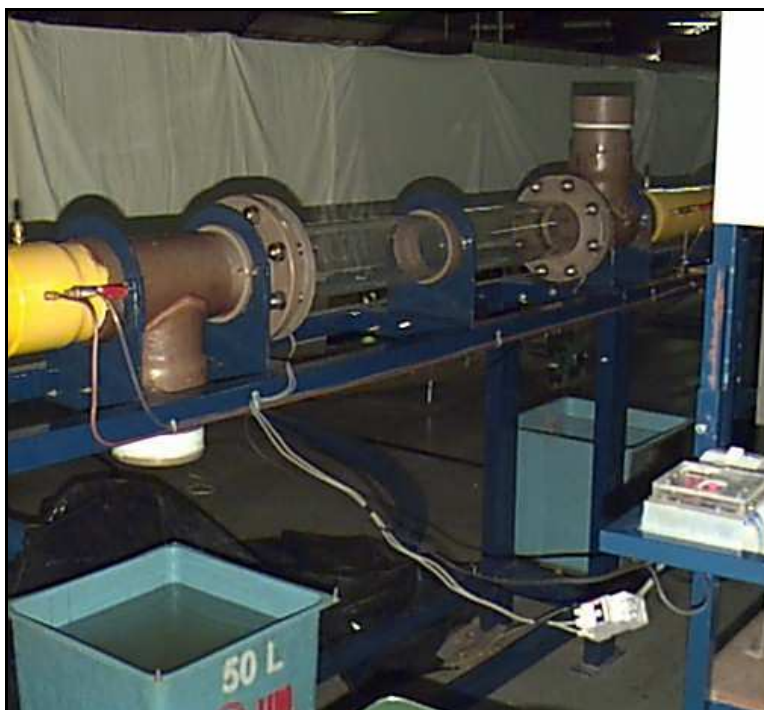


FIGURA 3.5-Vista geral da seção de teste

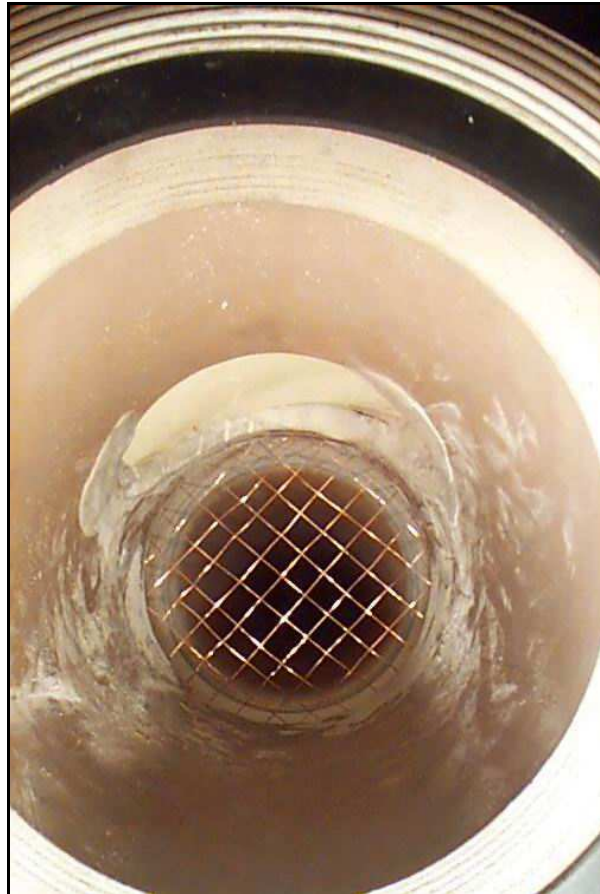


FIGURA 3.6- Tela feita de fio de cobre para confinamento do peixe na seção e teste.

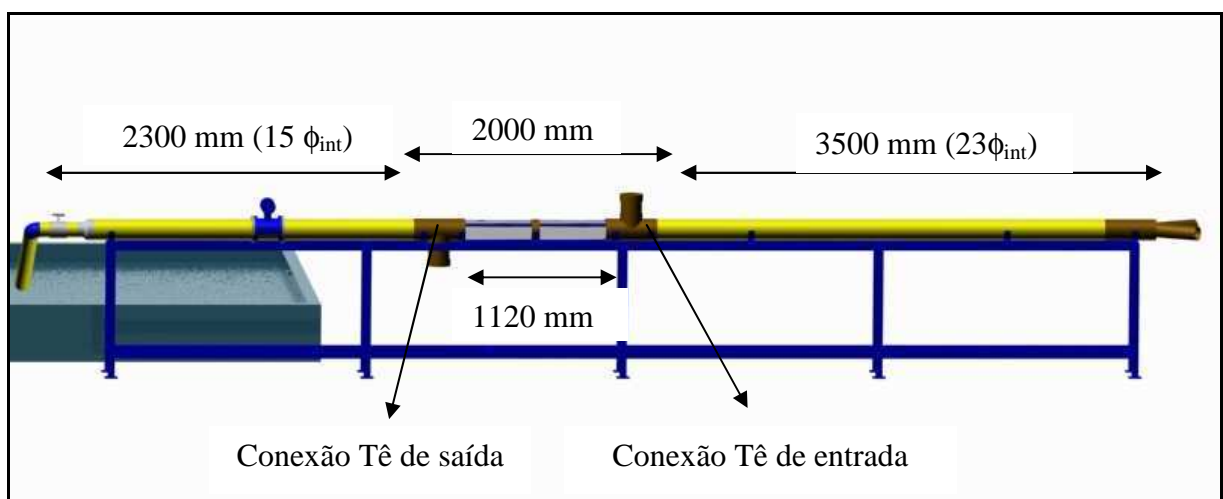


FIGURA 3.7- Esquema da tubulação rígida do terceiro aparato

As duas conexões Tê são vedadas por tampas e possuem um “soquete” que conduz o peixe para seção de teste. Esse componente também é responsável por conformar a confluência do

Tê, fazendo com que seção de teste não tenha locais aonde o escoamento possa desviar (FIG 3.8).

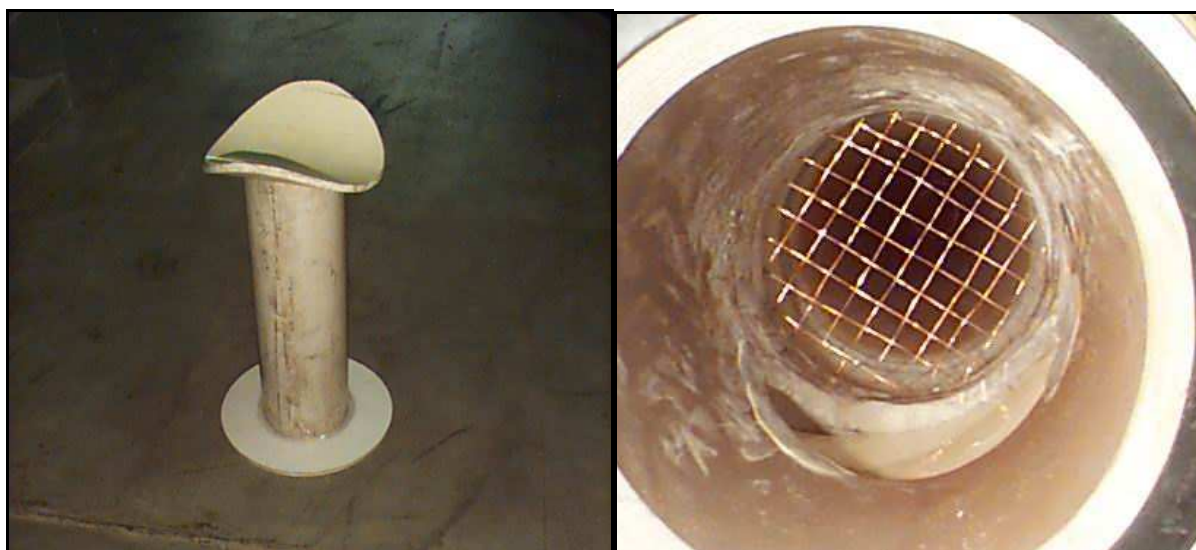


FIGURA 3.8 - a) Soquete das conexões Tê

b) vista interna da conexão com o soquete moldando a seção de passagem do escoamento e da grade

Como a pressão é um fator que pode influir na capacidade natatória do peixe, o aparato possui ainda entradas para manômetros do tipo Bourdon, antes e depois da seção de teste, bem como tomadas para pressão diferencial entre esses dois pontos (FIG. 3.9).

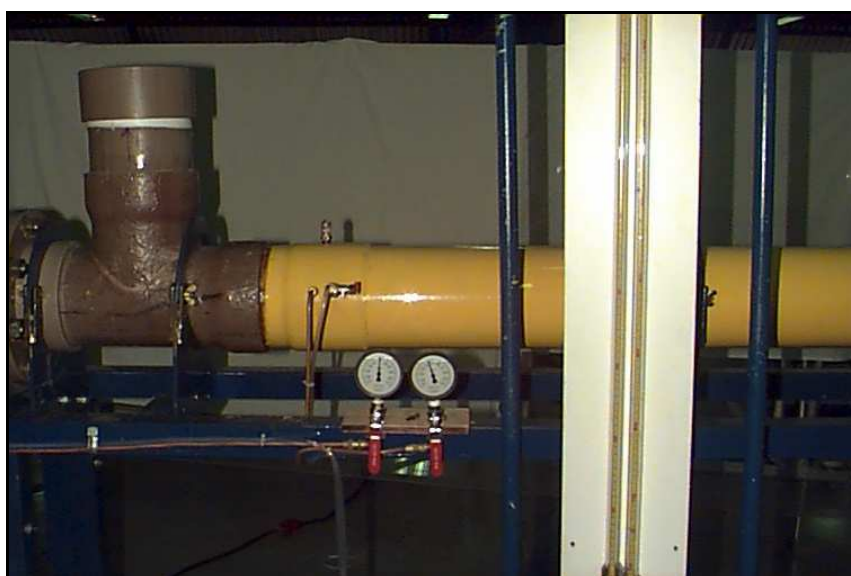


FIGURA 3.9-Tomadas de pressão e manômetros

Três registros gavetas fazem o controle da entrada e saída da água no aparato. Dois se situam nas saídas da bomba. O terceiro registro (R3) se localiza próximo ao final da tubulação rígida (FIG. 3.10) e possui acionamento elétrico. No processo de medição, eles são essenciais para manutenção de água dentro do sistema durante a colocação e a retirada do peixe, que ocorre com as bombas desligadas.



FIGURA 3.10-Registro gaveta de saída do aparato

Para melhor controle da vazão dentro do túnel hidrodinâmico as bombas são acionadas com conversores de frequência que, através da alteração desse parâmetro, mudam a rotação das bombas e conseqüentemente a vazão recalcada pela mesma. A FIG. 3.11 mostra os dois conversores usados, que são da marca Siemens e Weg.



FIGURA 3.11-Conversores de Frequência Siemens e Weg, respectivamente

### 3.1.3.2. Túnel Hidrodinâmico com diâmetro nominal de 250 mm

O segundo aparato experimental utilizado foi baseado nos mesmos princípios do primeiro. Objetivo da sua construção foi possibilitar a medição da capacidade natatória de espécies maiores, como a curimba, *Prochilodus costatus*.

Devido à algumas dificuldades encontradas no processo de manutenção dos peixes de maiores porte em laboratório, o segundo aparato foi construído pensando na possibilidade futura de seu uso em campo.

Dessa forma, o sistema consiste em um outro túnel hidrodinâmico cujo diâmetro nominal é de 250 mm. Para facilitar seu transporte, a estação de bombeamento é separada do conjunto onde está assentado o túnel (FIG. 3.12). Duas bombas centrífugas de 20 cv (FIG 3.13), instaladas de forma paralela, geram individualmente escoamentos que, após passarem por registros gaveta, são unificados no barrilhete. A junção do sistema de bombeamento com a tubulação rígida é feita por meio de mangote, cujo diâmetro é 8” (200 mm).

Logo no início do túnel, um laminador foi construído para reduzir os movimentos helicoidais do fluxo gerados pelas bombas (FIG. 3.14).

Após passar pelo laminador, o escoamento é conduzido por um trecho reto de tubulação, de DN igual a 8”, até um medidor eletromagnético de vazão. Logo em seguida, o diâmetro é aumentado para 10” (250 mm), através de uma ampliação. Trata-se do início da seção de teste, delimitada por uma tela, que evita a saída do peixe da área visualizável. A partir desse ponto tem-se uma tubulação de acrílico cujo comprimento é 1500 mm (FIG. 3.15).

Para confinar os peixes apenas no acrílico, a tela de montante da seção de teste é móvel. A FIG. 3.16 mostra o detalhe da movimentação dessa tela.

Após a seção de teste, segue uma cruzeta para introdução e retirada do peixe no aparato (FIG 3.17 a). O monitoramento da pressão dentro do aparato é feito por um manômetro Bourdon localizado antes da seção de acrílico (FIG. 3.15).

Finalmente para controle da pressão do escoamento dentro do aparato, um registro borboleta foi colocado no final da tubulação rígida (FIG. 3.17 b).

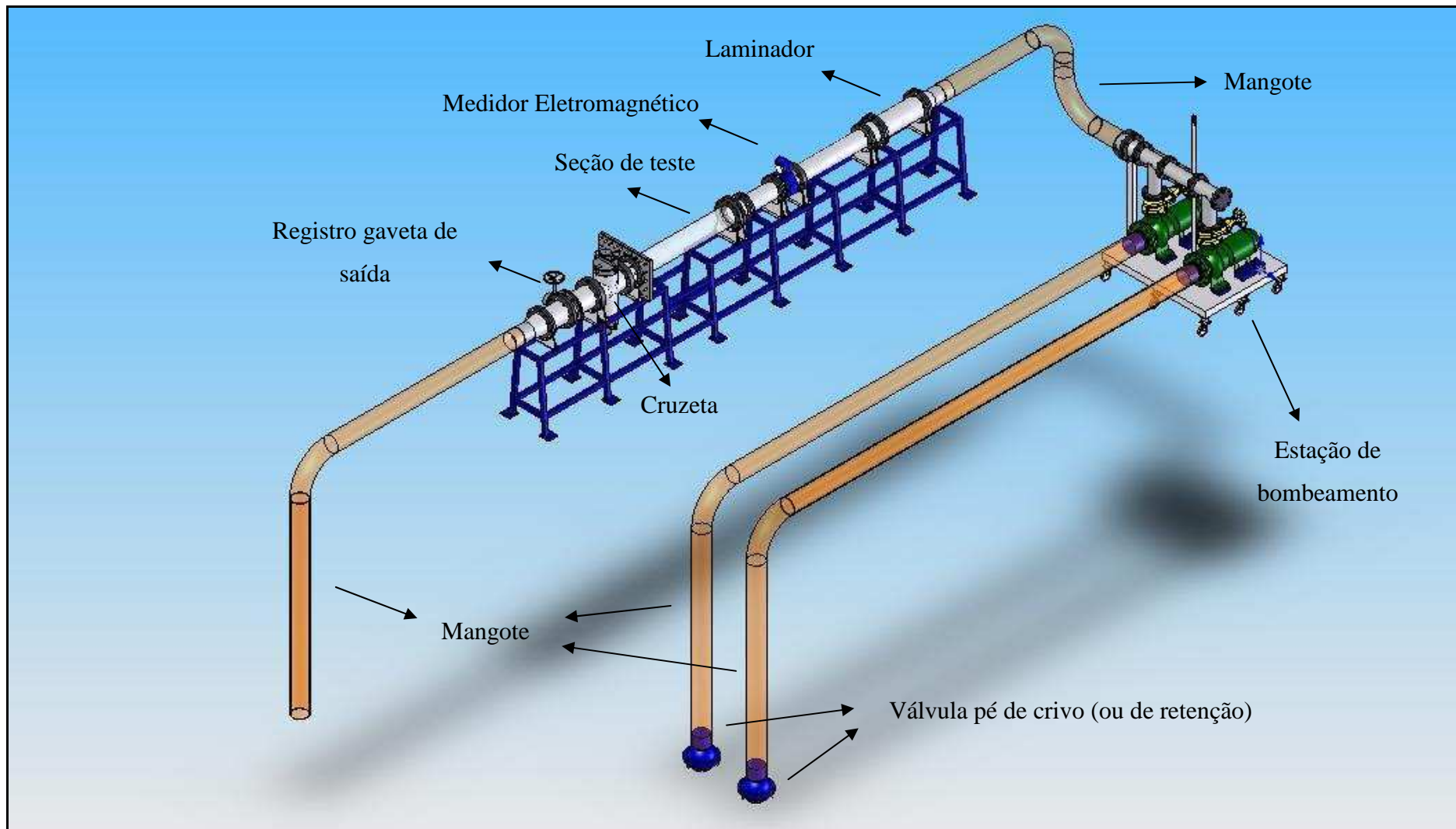


FIGURA 3.12- Esquema do aparato de DN 250 mm





FIGURA 3.13- Sistema de bombeamento do aparato 2



FIGURA 3.14- Laminador do aparato 2

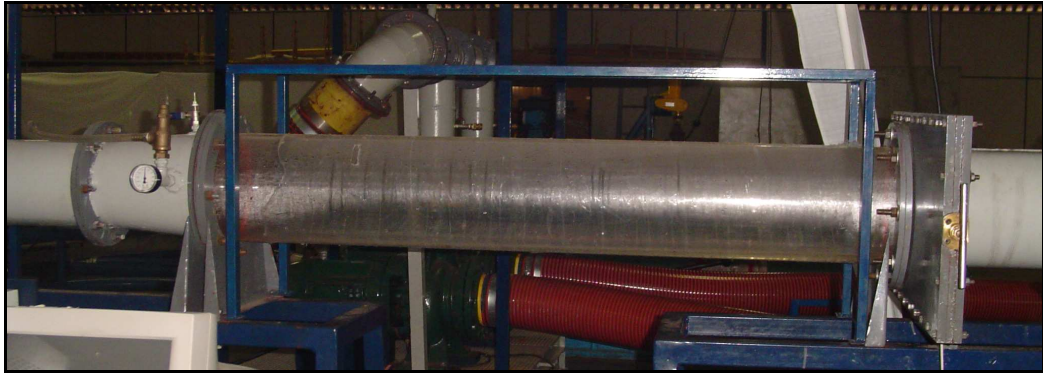


FIGURA 3.15- Seção de teste do aparato 2

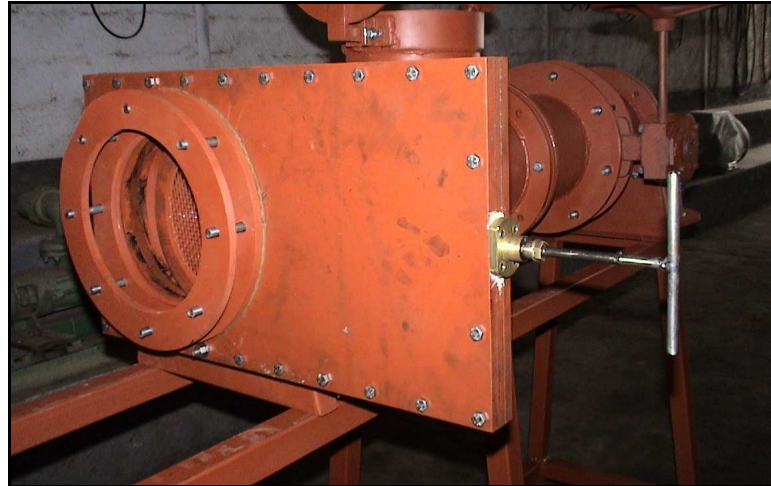


FIGURA 3.16- Detalhe da movimentação da tela de jusante

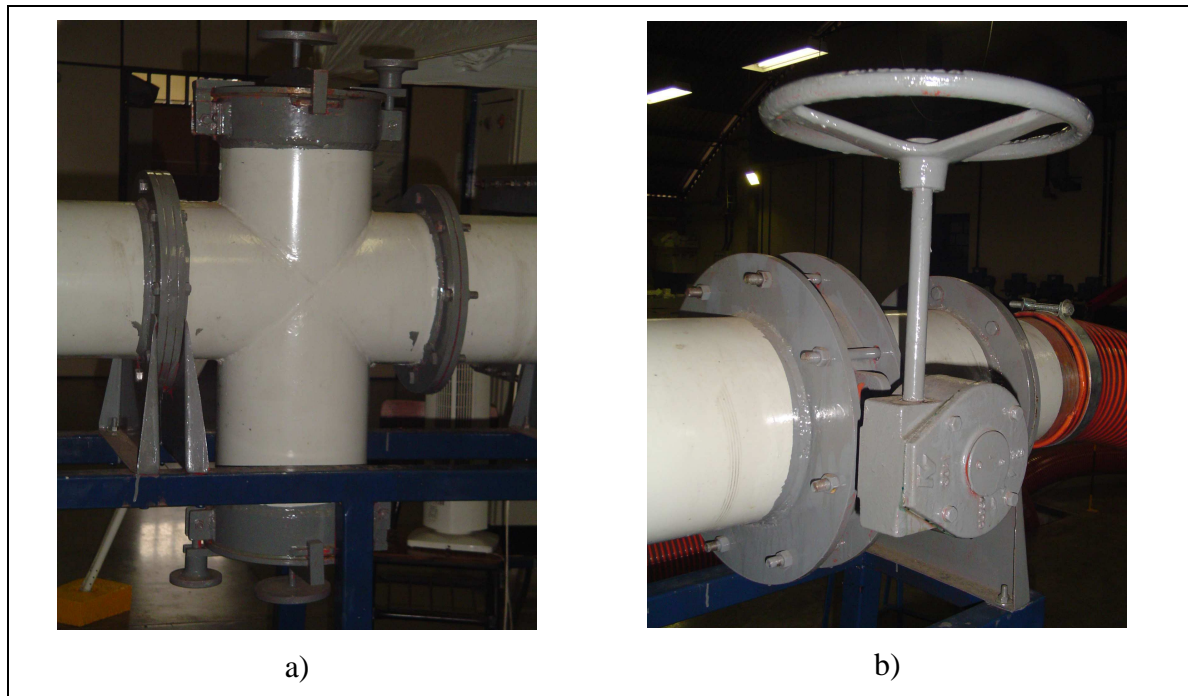


FIGURA 3.17 a) Cruzeta para introdução e retirada do peixe

b) Registro gaveta de saída

Para acionamento das bombas, foi construído um painel com 2 conversores de frequência e um exaustor (FIG. 3.18). Através dele podia-se alterar a rotação das bombas e conseqüentemente a vazão dentro da seção de teste.



FIGURA 3.18- Painel de acionamento das bombas

Para melhor visualizar as diferenças entre os dois aparatos a TAB. 3.2 traz uma comparação entre os mesmos.

TABELA 3.2

Especificações Técnicas dos dois aparatos experimentais

	Vazão Máxima (m <sup>3</sup> /s)	Diâmetro da Seção de Teste (mm)	Velocidade Máxima na Seção de teste (m/s)	Comprimento Total do Túnel Hidrodinâmico (m)	Potência de acionamento total (cv)
Aparato 1	0,042	150	2,6	7,80	15
Aparato 2	0,160	250	2,62	7,50	40

### 3.1.3.3. Montagem para medição da velocidade de explosão

Para se obter a velocidade de explosão, optou-se por utilizar um sistema estático, ou seja, sem escoamento, no qual o peixe desenvolvesse tal velocidade através de um estímulo mecânico. Assim, todo o processo de medição se baseia na aquisição da distância percorrida pelo peixe e no tempo gasto neste percurso.

Montou-se, portanto, um aquário (FIG. 3.19) cujo fundo e uma das laterais receberam um anteparo com divisões de 1 em 1 centímetro. Estas divisões foram marcadas com espessura mais grossa a cada 3 cm. Como a movimentação do peixe é livre dentro do aquário, o sistema de determinação da distância vertical e horizontal permite que seja analisada a explosão nas várias direções em que peixe pode assumir após estímulo.



FIGURA 3.19- Aparato para determinação da explosão

Para determinação tanto da distância como do tempo de explosão, todos os testes foram filmados com uma câmera Sony DCR-DVD201 NTSC. De forma obter o percurso na vertical e na horizontal, foi fixado um espelho inclinado logo acima do nível d'água (FIG. 3.19).

### **3.1.4. Procedimento Experimental**

#### **3.1.4.1. Velocidade Crítica**

Os testes de velocidade crítica foram realizados com base no procedimento experimental descrito por Brett em 1964. No caso do mandi, foram testados 38 indivíduos dos quais 24 foram bem sucedidos. Já nos testes do piau foram realizados um total de 40 entre os quais 25 foram utilizados nos cálculos. Para curimba, dos 31 indivíduos testados, 20 forneceram dados satisfatórios.

A escolha dos resultados dos ensaios de velocidade crítica ocorreu mediante a observação do comportamento do peixe após os testes, bem como os valores de velocidade apresentados pelos mesmos. Se a velocidade era baixa e logo após os testes o peixe morria, o ensaio era descartado.

Os testes com mandi ocorreram entre outubro de 2004 e fevereiro de 2005, os com piau entre fevereiro e abril de 2005 e os com curimba entre janeiro e fevereiro de 2006. Todos os períodos correspondem à época de piracema na região e foram escolhidos, entre outros motivos, devido à aplicação do presente estudo em MTP, que são utilizados pelos peixes principalmente nesse período do ano.

Após o transporte dos peixes para o laboratório, os mesmos permaneciam 24 horas no sistema de manutenção antes de serem testados. Normalmente, por dia eram realizados dois testes de velocidade crítica.

O teste era iniciado com a escorva do aparato, ou seja, a retirada do ar de dentro da tubulação pela água. Para isso, acionava-se uma das bombas na máxima rotação e após a escorva, reduzia-se a mesma juntamente com o fechamento dos registros de saída e entrada. Assim, a tubulação permanecia com água, o que permitia a introdução do peixe a ser testado.

Para não ocorrer choque térmico, cada espécime era aclimatado antes dos ensaios por meio da mistura gradual da água do aparato à água existente dentro do recipiente de transporte.

Então, sendo o peixe introduzido no sistema de medição, iniciava-se o teste colocando uma das bombas em baixa rotação. Cada velocidade do escoamento na seção de teste estava relacionada com uma rotação da bomba, o que foi determinado previamente através de uma calibração que utilizava o medidor de vazão e os conversores de frequência.

No início dos testes, os peixes permaneciam na velocidade inicial de 20 cm/s por 10 minutos para se adaptarem ao fluxo. A partir desse ponto, a cada 5 minutos a velocidade sofria um incremento de 5 cm/s. Esse intervalo de tempo foi escolhido com base nas observações de Santos (2004) que percebeu um melhor comportamento dos peixes e um ajuste melhor dos dados nos testes cujos incrementos temporais eram de 5 minutos. Já quanto aos valores de aumento da velocidade, seguiu-se as análises de Farlinger e Beamish (1977) que constataram um valor de velocidade crítica maior para os ensaios realizados com incrementos de velocidade entre 10 cm/s e 5 cm/s. Assim, optou-se por 5 cm/s para uma melhor adaptação do peixe à variação de fluxo.

Para contagem do intervalo de tempo foi utilizado um cronômetro regressivo. Após sucessivos incrementos de 5 cm/s na velocidade chegava a um ponto onde peixe não resistia ao escoamento. Durante todo o processo de medição, os espécimes evitam permanecer próximos à grade de jusante. No entanto, a partir de uma certa velocidade isso não era possível, sendo o peixe levado para o fundo da seção de teste. Iniciava-se então o processo de utilização da velocidade de explosão para retornar a posição anterior. Portanto, a fadiga do peixe era considerada quando o mesmo, após várias tentativas de explosão, não conseguia permanecer na seção de acrílico do aparato de DN 150 mm. Já no aparato de 250 mm, como o peixe permanecia visível durante todo o ensaio, a fadiga era considerada quando o mesmo não conseguia permanecer longe da grade de jusante (da seção de teste) por mais de 5 minutos.

Os parâmetros de qualidade da água (oxigênio dissolvido, temperatura e pH) eram monitorados durante todo o ensaio de velocidade crítica.

Após a retirada do peixe do aparato, pesava-se o mesmo e media-se seu comprimento total, padrão, altura máxima e largura máxima (FIG. 3.19).

Encerrado o teste, o peixe retornava para o sistema de manutenção e ficava em observação. Caso o mesmo morresse logo em seguida e o resultado de velocidade crítica, apresentado por esse indivíduo, fosse muito diferente dos observados nos ensaios anteriores, o teste era descartado.

Devido ao fato da perda de capacidade natatória e à própria fadiga criada durante o ensaio, cada exemplar só era testado apenas uma vez. A constatação desta perda ocorreu mediante o

teste de um piauí 2 vezes. No primeiro ensaio, o exemplar apresentou uma velocidade crítica de 1,55 m/s enquanto no segundo, realizado 12 dias após o primeiro, o peixe nadou 1,20 m/s.

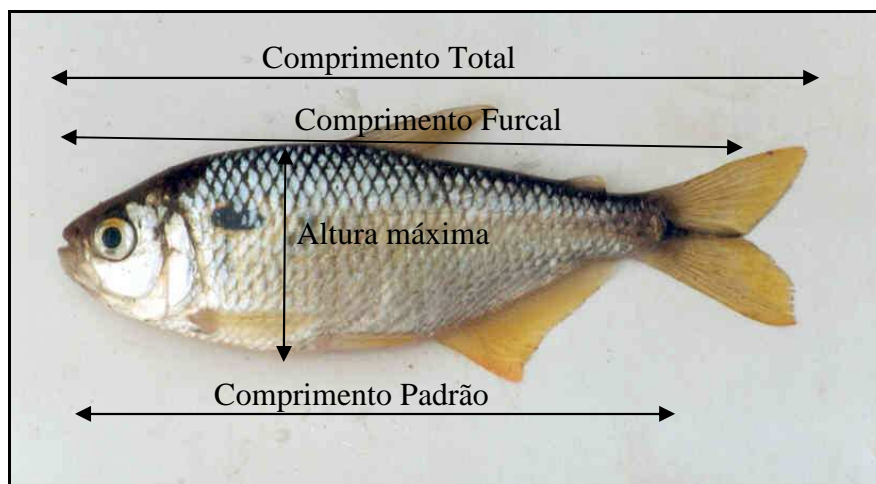


FIGURA 3.20 - *Astyanax bimaculatus* com indicações dos tipos de comprimentos medidos

FOTO: POMPEU

A perda de capacidade natatória também ocorre quando o peixe permanece por muito tempo no sistema de manutenção. Dessa forma, a partir de observações, adotou-se o tempo limite para testes de 7 dias para mandis e 15 dias para piaús, após a sua captura no campo.

Na medição da velocidade crítica, procurou-se obter mais de 20 testes bem sucedidos, utilizando-se de indivíduos com tamanho o mais variado possível. Após os testes, as velocidades obtidas eram corrigidas, como será explicado mais a frente.

Os valores de velocidade crítica foram calculados com base na fórmula abaixo, já citada em capítulos anteriores:

$$V_{crit} = U_{max} + \frac{t_f}{t_i} \times \Delta U \quad \text{EQ. 3.1}$$

onde  $U_{max}$  é a velocidade máxima,  $\Delta U$  o incremento de velocidade,  $t_i$  o intervalo de tempo e  $t_f$  o tempo que o peixe nadou dentro do último intervalo de tempo.

#### 3.1.4.2. Velocidade Prolongada

Os testes de velocidade prolongada foram baseados na metodologia utilizada por Brett (1967) e Jones e colaboradores (1974), tendo como parâmetro balizador os resultados obtidos nos ensaios de velocidade crítica.

Conhecidos também como testes de velocidade fixa, tal medição consiste basicamente em colocar o peixe em um escoamento com uma determinada velocidade e verificar o tempo de permanência do mesmo neste fluxo. Dessa forma, para determinação de um procedimento experimental prático e simples, escolheram-se valores de velocidade fixa através da velocidade crítica da espécie para o comprimento de primeira maturação e do comprimento total médio dos indivíduos capturados nos testes dessa última velocidade. A opção por esse tamanho de peixe foi feita tendo em vista a aplicação do presente estudo em MTP, que devem ser construídos para atender, como primeiro objetivo mas não único, a demanda dos peixes no período de reprodução, e a possibilidade de captura dos indivíduos na natureza. Assim, nos testes de velocidade prolongada os peixes foram submetidos a porcentagens da velocidade crítica.

No caso do piau, optou-se por utilizar o comprimento total de 16 cm, uma vez que tal valor é próximo ao comprimento padrão de primeira maturação fornecido por Rizzo *et al* (1996): 12,9 cm para machos e 14 cm para fêmeas. Assim, entrando com esse valor na equação de velocidade crítica (obtida através da regressão entre a velocidade e o comprimento total) para essa espécie, que será mostrada no capítulo de resultados, sabe-se que um exemplar de 16 cm deve nadar 1,32 m/s no modo prolongado crítico. Feito isso, foram escolhidas porcentagens da velocidade crítica. A TAB. 3.3 mostra os valores de velocidade fixa utilizados para as três espécies. Para a curimba, foi utilizado o comprimento de 29 cm uma vez que dados bibliográficos indicam que comprimento padrão de primeira maturação é 25 cm para machos e 27 cm para fêmeas (Sato e Godinho, 1988). Já no caso do mandi, o tamanho de primeira maturação é 19 cm de comprimento total (Sato e Cardoso, 1988). No entanto, diante da dificuldade de capturar indivíduos próximos a 19 cm optou-se por utilizar o comprimento total médio dos indivíduos testados na velocidade crítica, ou seja, 23 cm.

Como indicado na TAB. 3.3, os testes de velocidade prolongada envolviam ensaios com velocidades bem baixas (60% da velocidade crítica, no caso do mandi) até ensaios com valores bem elevados (130 % da velocidade crítica, no caso da curimba). Dessa forma, nos testes mais rápidos era praticamente impossível introduzir o peixe ao escoamento com tais velocidades. Portanto, para padronizar os ensaios e permitir uma aclimação do peixe, era realizado um aumento gradual da velocidade em intervalos de tempo.

Inicialmente, antes desse incremento, o peixe permanecia no escoamento de 20 cm/s durante 10 minutos. Logo em seguida promovia-se o aumento da velocidade, que deveria ocorrer num



tempo total de 12 minutos. Esse procedimento foi adotado para todos testes de velocidade prolongada e foi baseado na metodologia descrita por Jones e colaboradores (1974).

TABELA 3.3  
Valores de velocidade prolongada para as duas espécies

	Mandi	Piau	Curimba			
Comprimento adotado como referência (cm)	23	16	29			
Velocidade crítica do comprimento referência (m/s)	1,47	1,32	1,23			
Velocidade	Prolongada em valores absolutos (m/s)	Prolongada em % da Velocidade Crítica	Prolongada em valores absolutos (m/s)	Prolongada em % da Velocidade Crítica	Prolongada em valores absolutos (m/s)	Prolongada em % da Velocidade Crítica
Prolongada	0,9	61	0,95	72	1,00	81
	1	68	1,05	79	1,10	89
	1,1	75	1,15	87	1,20	98
	1,2	81	1,25	94	1,30	106
	1,3	88	1,35	102	1,40	114
	1,4	95	1,45	109	1,50	122
	1,5	102	1,55	117	1,60	130
	1,6	108	1,65	125		

Logo que a velocidade do escoamento chegava ao valor predeterminado para o ensaio, um cronômetro era liberado para marcação do tempo de fadiga. Essa última, da mesma forma da velocidade crítica, era considerada no aparato de DN 150 mm quando o peixe, após várias tentativas de explosão, não conseguia permanecer na seção de acrílico e no aparato de DN 250 mm quando o indivíduo permanecia mais de 5 minutos encostado na grade de jusante.

Nos testes com velocidades mais elevadas, alguns peixes não conseguiam atingir a velocidade predeterminada para o ensaio, fadigando durante o período de aceleração de escoamento. Quando essa fadiga ocorria muito próxima do valor de velocidade desejado, considerava-se que o tempo de fadiga era igual à zero.

Já quando a velocidade era muito baixa, os peixes permaneciam nadando por muito tempo. Dessa forma, foi utilizado tempo de corte de 200 minutos, no qual o teste era encerrado caso não houve fadiga do peixe. Este valor é adotado como o limite entre a velocidade prolongada e a velocidade sustentável (Beamish, 1978). A determinação do mesmo foi realizada por Brett em 1964, que percebeu que, para este tempo, a reta velocidade *versus* tempo de fadiga sofria uma inflexão para o salmão (FIG. 3.20).

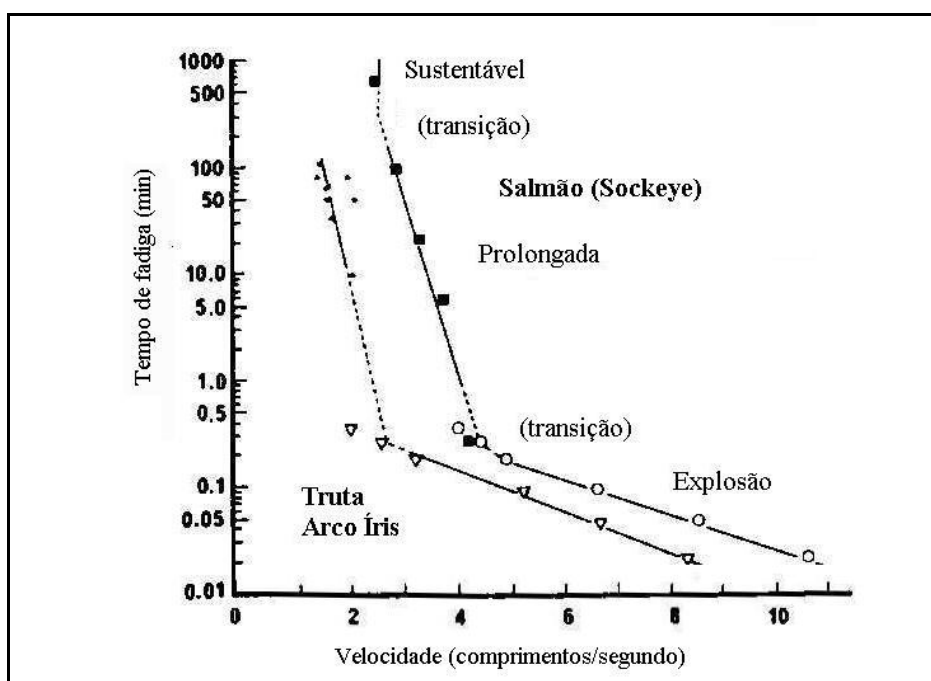


FIGURA 3.21 – Tempo de transição entre tipos de velocidade

FONTE: BRETT, 1964, p. 1217

Os parâmetros de qualidade da água (oxigênio dissolvido, temperatura e pH) eram registrados durante todo o ensaio de velocidade prolongada.

Após a retirada do peixe do aparato, pesava-se o mesmo e media-se seu comprimento total, padrão, altura máxima e largura máxima, sendo finalmente encaminhado ao sistema de manutenção.

Da mesma forma que a velocidade crítica, para a determinação da velocidade prolongada os peixes permaneciam 24 horas no sistema de manutenção antes de serem testados e não eram ensaiados quando sua permanência no laboratório superava 7 dias para mandis e 15 dias para piaus. O levantamento dessa velocidade foi realizado entre abril e maio de 2005 para o mandi, entre outubro e dezembro de 2005 para o piau e em fevereiro de 2006 para a curimba. A diferença de temperatura entre estes períodos de teste pode influenciar as velocidades obtidas.

Diferentemente do processo de medição de velocidade crítica, os espécimes utilizados na determinação da velocidade prolongada foram escolhidos com base no comprimento total, que deveria ser próximo da média dos comprimentos dos indivíduos testados na velocidade crítica. No entanto, apesar dessa preocupação, era praticamente impossível conseguir sempre indivíduos do mesmo comprimento. Dessa forma, após o ensaio, a velocidade prolongada era corrigida em relação à obstrução e a incerteza (o que será detalhado no próximo item) e adimensionalizada em relação ao comprimento total (o valor absoluto era dividido pelo comprimento total do peixe).

#### 3.1.4.3. Velocidade de explosão

A obtenção da velocidade de explosão consiste na criação de um estímulo que, de certa forma, induza o peixe a desenvolver a explosão, utilizada apenas em casos extremos. Sendo assim, estes testes se caracterizam por gerar um grande estresse nos indivíduos ensaiados.

Procurou-se utilizar nestes experimentos apenas indivíduos recém coletados, ou seja, indivíduos que estivessem no laboratório no máximo a 2 dias. Isto porque à medida que os peixes ficam no sistema de manutenção, os mesmos acostumam com a presença humana e durante os testes dificilmente desenvolvem a explosão.

Assim, entre os dias 5 e 11 do mês de novembro de 2006, foram ensaiados 7 curimbas e 9 piaus recém coletados. Não foram ensaiados mandis devido a dificuldade dos mesmos em responderem aos estímulos.

Os testes começavam com a adaptação do peixe no aquário de ensaio durante 15 minutos. Em seguida, era iniciada a filmagem e a seqüência de estímulos. Estes últimos eram produzidos por uma haste que, de forma bem rápida, era conduzida à nadadeira caudal do peixe. Após cada explosão esperava-se 3 minutos para se produzir o estímulo seguinte, o que garantia ao indivíduo testado um descanso. O tempo máximo de ensaio era de 30 minutos.

Ao final dos testes os peixes eram pesados e medidos, retornando ao sistema de manutenção.

A fase seguinte consistia na análise dos filmes produzidos. Com a ajuda do software Virtualdub, os filmes eram analisados quadro a quadro, de forma a obter o instante inicial e final de cada explosão desenvolvida pelos peixes testados.

Por meio das imagens era calculada a distância, contando os quadrantes que determinada parte do peixe percorreu. Como o peixe desloca tridimensionalmente, ou seja, ele possui um deslocamento nos dois planos filmados, a distância total era obtida através da EQ. 3.2, onde eram consideradas a distância vertical, obtida pelo espelho (FIG. 3.21), e a distância horizontal, obtida pela observação direta do aquário. A terceira dimensão seria a distância vertical obtida pela observação direta do aquário (FIG. 3.22). No entanto, como a lâmina d'água era pequena, os peixes realizavam pequenos deslocamentos nesta direção. Dessa forma, optou-se por desprezá-los. A FIG. 3.23 mostra o deslocamento de indivíduo durante a explosão.

$$D_E = \sqrt{D_{horizontal}^2 + D_{vertical}^2} \quad \text{EQ. 3.2}$$

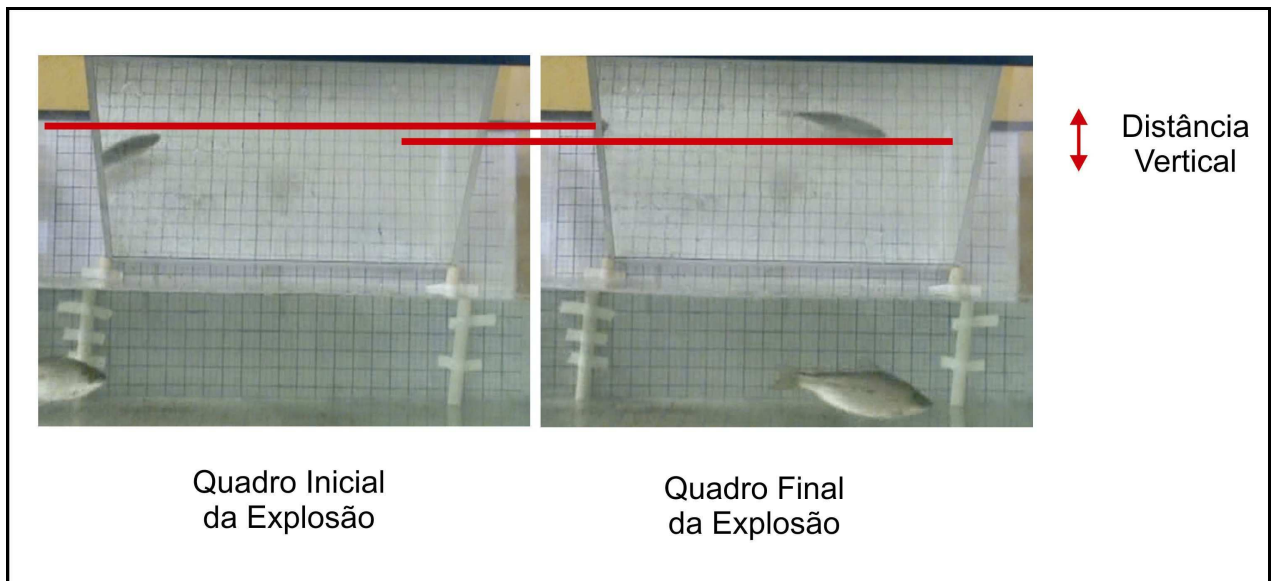


FIGURA 3.22- Distância vertical obtida através do espelho

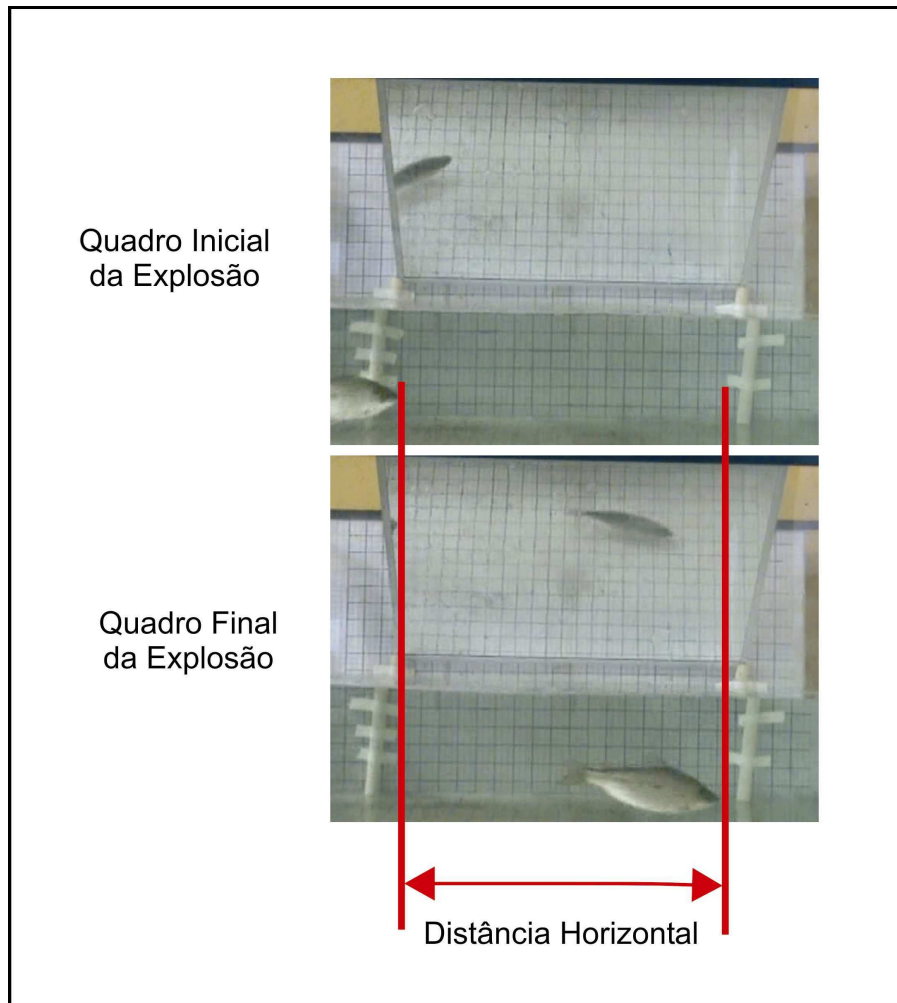


FIGURA 3.23 – Distância vertical obtida através da observação do aquário

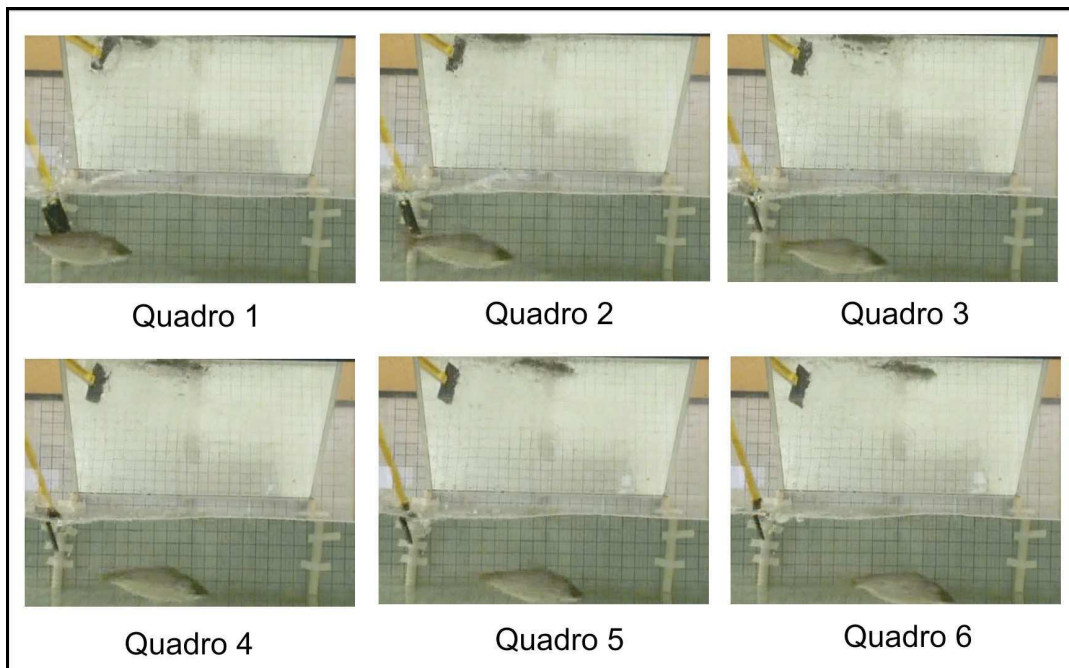


FIGURA 3.24- Seqüência de uma explosão

O tempo era obtido multiplicando o número de quadros, compreendidos entre o início e o final da explosão, pelo tempo unitário da câmara ( $1s/30 = 0,033s$ ). Dessa forma, a velocidade de explosão é o resultado da divisão da distância pelo tempo, ambos obtidos pela filmagem.

### 3.1.5. Correções e incertezas da velocidade

#### 3.1.5.1. Efeitos de interferência

Todo parâmetro fisiológico medido dentro de túneis hidrodinâmicos requer correções, uma vez que suas paredes exercem efeitos sobre os processos de medição (Webb, 1975). Essas correções estão relacionadas à forma do peixe e às características do túnel (Pope e Hae, 1966; Bell e Terhune, 1970). A FIG. 3.24 mostra os principais tipos de efeitos, dos quais o primeiro, empuxo horizontal, e os dois últimos, impedimento sólido e correção de propulsores devem ser aplicados para medições de natação (Webb, 1975).

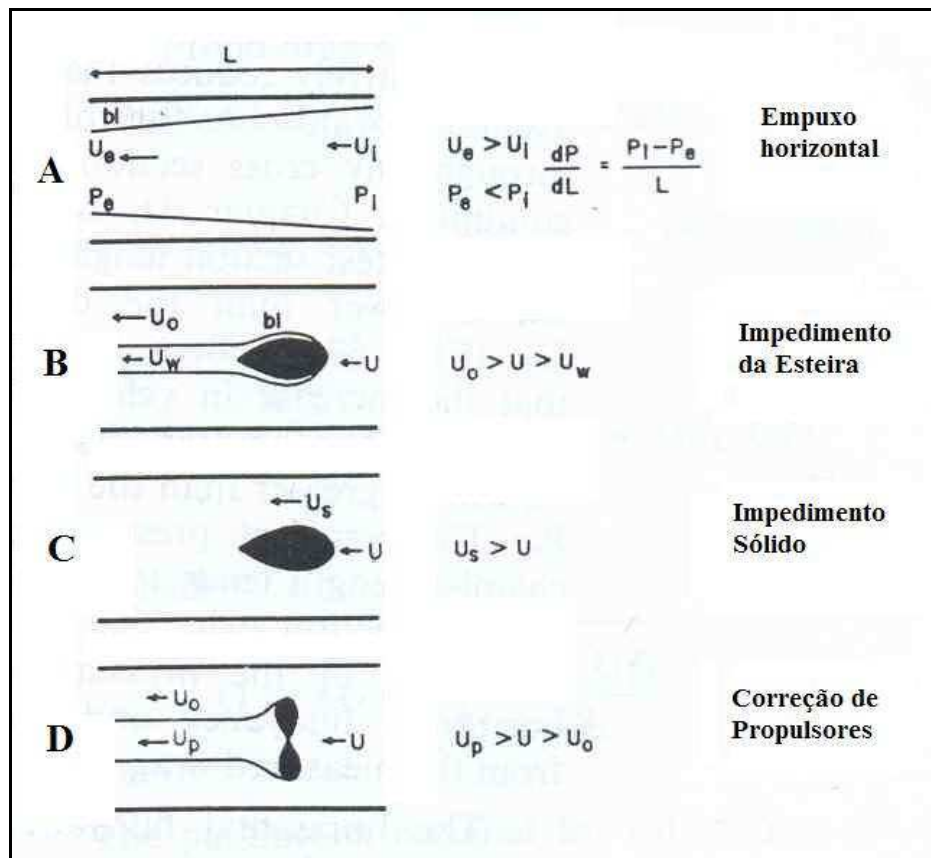


FIGURA 3.25- Efeitos decorrentes de medições em túneis hidrodinâmicos.

FONTE: WEBB, 1975. p. 147

O efeito empuxo horizontal ocorre devido ao aumento da pressão estática, ou gradiente de pressão adverso, ao longo do túnel. Com isso a camada viscosa, também conhecida como

camada limite, sofre um aumento, reduzindo a área efetiva do escoamento e aumentando a velocidade do mesmo. Esse tipo de efeito atua aumentando o arrasto (Webb, 1975).

Já o efeito de correção dos propulsores está relacionado à esteira que é formada atrás do propulsor. Nela a velocidade do escoamento é maior do que a velocidade do fluxo antes de encontrar o objeto. Isso resulta uma diminuição da velocidade fora da esteira, região que teria uma pressão menor. Este efeito atua de forma oposta ao empuxo horizontal, diminuindo o arrasto. Como a grandeza desses dois efeitos é praticamente a mesma, na natação de peixes a única correção de grande significância é o impedimento sólido (Webb, 1975).

Este por sua vez ocorre devido à diminuição da área transversal do túnel consequência da obstrução causada pelo objeto. Assim, o escoamento em torno desse último é acelerado e, portanto, a velocidade no qual está submetido é maior do que a inicialmente calculada.

Várias são as formulações para a determinação do efeito de impedimento sólido. A mais simples consiste em calcular a máxima obstrução causada pelo objeto através de sua maior área transversal e subtraí-la da seção do túnel. Assim, utilizando a equação da continuidade, obtém-se a velocidade real em torno do peixe. No entanto, para corpos fusiformes, de formato mais hidrodinâmico, o valor encontrado para velocidade é superior ao que ocorre realmente, pois a correção média depende da forma do peixe e da distribuição da obstrução ao longo do comprimento (Webb, 1975).

Assim, para medição de velocidade de peixes dentro de túneis hidrodinâmicos, utiliza-se a EQ. 3.3:

$$V_{\text{corrigida}} = \frac{V_{\text{medida}} K_3 \tau_1 (\text{volume do peixe})}{C^{3/2}} \quad \text{EQ. 3.3}$$

onde  $K_3$  é fator de forma de corpo (FIG. 3.25),  $\tau_1$  fator sobre a forma da seção de teste, igual a 0,8 pra seção transversal circular (Pope e Hae, 1966), e  $C$  a área transversal do túnel. Segundo Pope e Hae (1966), a EQ. 3.4 é uma boa aproximação para determinação do volume de um objeto de revolução.

$$\text{Volume} = 0,45e^2L \quad \text{EQ. 3.4}$$

onde  $e$  é a espessura máxima do peixe (média entre a largura e altura máximas) e  $L$  o comprimento total do peixe.

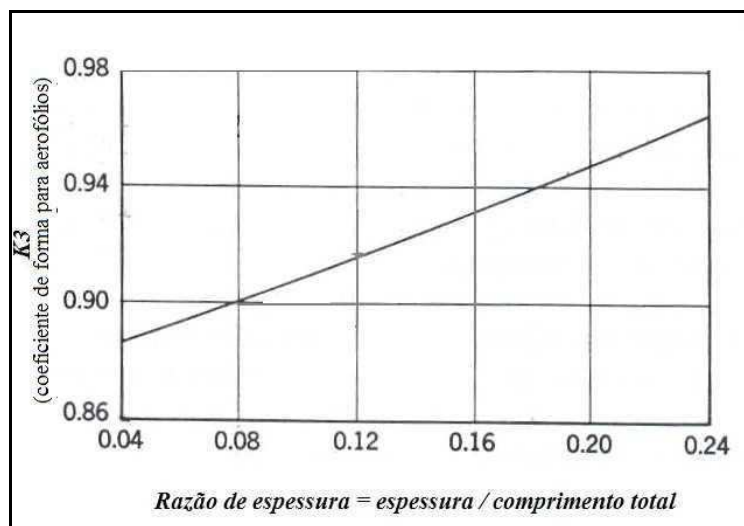


FIGURA 3.26- Gráfico para determinação de  $K_3$

FONTE: Pope e Hae, 1966. p. 365

Dessa forma, tanto os dados de velocidade crítica como de velocidade prolongada foram corrigidos quanto aos efeitos de impedimento sólido.

### 3.1.5.2. Incerteza de medição

Todo processo de medição envolve incertezas que vão desde as causadas pelos operadores do sistema até as intrínsecas dos equipamentos utilizados e do comportamento dos animais testados. Assim, tanto para velocidade crítica como para a prolongada, foi realizado um levantamento dessas incertezas, utilizando o método de avaliação de incertezas em medições indiretas. A razão para isso está no fato de não medirmos diretamente a velocidade do peixe, através de um único instrumento de medição, sim através da determinação da vazão que, juntamente com a equação da continuidade, fornece a velocidade do fluxo.

Assim, os parâmetros medidos para determinação da velocidade são a vazão e o diâmetro da seção de teste. É a partir da incerteza desses últimos que será calculada a incerteza da velocidade crítica e prolongada.

De uma forma geral, a incerteza está relacionada ao erro de medição e esse por sua vez pode ser dividido em erro sistemático, aleatório e grosseiro (Gonçalves, 2001).

O erro sistemático é a parcela de erro sempre presente nas medições realizadas em idênticas condições de operação. Um dispositivo mostrador com seu ponteiro torto é um exemplo clássico desse tipo de erro. A estimativa do erro sistemático da indicação de um instrumento de medição é também denominada Tendência ( $Td$ ) (Gonçalves, 2001).



Já o erro aleatório está relacionado a variações imprevisíveis que ocorrem tanto para cima como para baixo do valor médio das medidas. Diversos fatores contribuem para o surgimento do erro aleatório como a existência de folgas, atrito, vibrações, flutuações de tensão elétrica, instabilidades internas, das condições ambientais ou outras grandezas de influência (Gonçalves, 2001).

Quanto ao erro grosseiro, tem-se que sua existência é decorrência do mau uso ou mau funcionamento do sistema de medição (SM). Pode, por exemplo, ocorrer em função de leitura errônea, operação indevida ou dano do SM. Seu valor é totalmente imprevisível, porém geralmente facilmente detectável (Gonçalves, 2001).

Assim, a incerteza é um parâmetro que indica a provável dispersão de valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando, ou seja, é um parâmetro obtido estatisticamente através dos erros de medida. Dentre os tipos de incerteza estão (Gonçalves, 2001):

- A incerteza padrão ( $u$ ) de um dado efeito aleatório, que corresponde à estimativa equivalente a um desvio padrão da ação desse efeito sobre a indicação;
- A incerteza combinada ( $u_{comb}$ ) de um processo de medição, calculada considerando a ação simultânea de todas as fontes de incerteza e que corresponde a um desvio padrão da distribuição resultante;
- A incerteza expandida ( $U_{exp}$ ), associada a um processo de medição e estimada a partir da incerteza combinada multiplicada pelo coeficiente *t-Student* ( $t$ ) apropriado. Essa incerteza reflete a faixa de dúvidas ainda presentes nesta medição para uma probabilidade de enquadramento definida, geralmente 95 %. O valor da incerteza expandido é dada pela EQ. 3.5.

$$U_{exp} = ut \quad \text{EQ. 3.5}$$

Tomando como exemplo um dos ensaios, a TAB. 3.4 mostra o cálculo da incerteza da vazão. No caso da velocidade crítica esta vazão corresponde à vazão máxima suportada pelo peixe. Para esse levantamento, as fontes de incerteza consideradas foram a repetitividade e o erro fornecido pelo fabricante do instrumento de medição, sendo a primeira uma forma quantitativa de exprimir o erro aleatório. Ambas as fontes estudadas não possuem a parcela sistemática da incerteza, como indicado na TAB. 3.4.

O valor bruto ( $VB$ ) da repetitividade é calculado através da EQ. 3.6 onde  $s(q)$  é o desvio padrão experimental (EQ. 3.7) e  $n$  o número de amostras (Gonçalves, 2001):

$$VB = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad \text{EQ. 3.6}$$

$$s(q) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}} \quad \text{EQ. 3.7}$$

Nas equações acima,  $q$  são os valores medidos, no caso do estudo da vazão.

TABELA 3.4  
Levantamento de incertezas da vazão

Fontes de incerteza		Efeitos Sistemáticos		Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	correção (L/min)	valor bruto (L/min)	tipo de distribuição	Fator de abrangência ( $k$ )	$U$ (L/min)	$\nu$
$RE$	Repetitividade	0	2,04	normal	1	2,04	9
	Incerteza fornecida pelo fabricante	0	5,72	normal	2	2,86	infinito
$C_c$	Correção combinada	0					
$u_{comb}$	Incerteza padrão combinada			normal		3,51	80
$U_{exp}$	Incerteza expandida			normal		7,03	

Já o valor bruto da incerteza do medidor de vazão fornecida pelo fabricante é igual a 0,5 % (valor indicado no manual do medidor) da média das observações.

Para a determinação da incerteza expandida, deve-se assumir uma distribuição para o erro. Quando o levantamento de informações envolve um volume expressivo de dados adota-se a distribuição normal. O mesmo ocorre com os dados fornecidos pelos fabricantes, supondo-se

que para a calibração do instrumento um número razoável de medidas foi levantado (Gonçalves, 2001).

Com relação ao fator de abrangência, quando o valor bruto é obtido através do desvio padrão das observações adota-se  $k$  igual a 1. Nos outros casos de distribuição normal adota-se 2 (Gonçalves, 2001). A incerteza padrão ( $u$ ) é obtida através da divisão do valor bruto pelo fator de abrangência.

A última coluna das tabelas de incerteza indica o número de graus de liberdade associado a cada fonte de incerteza. Assim, para a retitividade o grau de liberdade é número de medidas ( $n$ ) menos 1. Já para incerteza do medidor fornecida pelo fabricante, assume-se que o número de medidas utilizado pelo mesmo é bastante grande. Com isso adota-se o grau de liberdade infinito.

Feito o levantamento das incertezas padrão de item, calcula-se a incerteza combinada ( $u_{comb}$ ) por meio da EQ. 3.8 (Gonçalves, 2001):

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_p^2} \quad \text{EQ. 3.8}$$

onde  $p$  é o número de fontes de incerteza.

Em seguida, determina-se o grau de liberdade efetivo ( $v_{ef}$ ) para a incerteza padrão combinada, através da EQ. 3.9 (Gonçalves, 2001):

$$\frac{u_c}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad \text{EQ. 3.9}$$

onde  $v_1, v_2 \dots v_p$  são os graus de liberdade de cada fonte de incerteza.

De posse do grau de liberdade efetivo e assumido que a distribuição da incerteza expandida seja a normal, encontra-se o valor do coeficiente *t-student* para um intervalo de 95% de confiança. Finalmente, calcula-se a incerteza expandida através da EQ. 3.5.

Já para o levantamento da incerteza do diâmetro da seção de teste do aparato de DN 150, foram feitas 10 medições com um paquímetro. A TAB. 3.5 mostra os valores obtidos para o diâmetro bem como a média e o desvio padrão das medidas.

TABELA 3.5

Valores medidos, média e desvio padrão do diâmetro da seção de teste do aparato DN 150

Medidas	DN	Medidas	DN
1	14,42	7	14,52
2	14,60	8	14,36
3	14,35	9	14,43
4	14,91	10	14,51
5	14,23	média	14,48
6	14,48	Desvio padrão	0,183

TABELA 3.6

Levantamento de incertezas do diâmetro da seção de teste do aparato de DN 150

Fontes de incerteza		Efeitos Sistemáticos		Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	correção (mm)	valor bruto (mm)	tipo de distribuição	Fator de abrangência ( $k$ )	$u$ (mm)	$\nu$
$RE$	Repetitividade	0	0,018	normal	1	0,018	9
	Resolução	0	0,005	retangular	$\sqrt{3}$	0,003	infinito
$C_c$	Correção combinada	0					
$u_{comb}$	Incerteza padrão combinada			normal		0,019	9
$U_{exp}$	Incerteza expandida			normal		0,04	

No estudo de incertezas do diâmetro, as fontes de incerteza consideradas foram a repetitividade e a resolução do paquímetro. Esse último está relacionado a uma componente adicional de erro devido ao truncamento numérico. O efeito da resolução é de natureza aleatória e seu valor bruto é adotado com sendo metade do seu valor. Na vazão, a resolução não foi considerada, uma vez que a própria incerteza fornecida pelo fabricante provavelmente abrange tal fonte.

A distribuição da incerteza da resolução é assumida como retangular, por se acreditar que a probabilidade de ocorrência do truncamento é igual para todas medidas. O fator de abrangência para essa distribuição é  $\sqrt{3}$ .

Assim, de posse da incerteza da vazão máxima e do diâmetro, foi calculada a incerteza da velocidade máxima suportada pelo peixe ( $U_{max}$ ), assumindo que as variáveis medidas fossem estatisticamente independentes. Neste cálculo foi utilizada a EQ. 3.10 (Gonçalves, 2001) para uma função  $G = f(x_1, x_2, x_3 \dots)$ .

$$u^2(G) = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1) \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} u(x_2) \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_3} u(x_3) \right)^2 + \dots \quad \text{EQ. 3.10}$$

Assim, para a velocidade, a equação de incerteza máxima é :

$$u(U_{max}) = \sqrt{\left( \frac{8Q}{3,14D^3} u(D) \right)^2 + \left( \frac{4}{3,14D^2} u(Q) \right)^2} \quad \text{EQ. 3.11}$$

É importante ressaltar que antes do cálculo da incerteza, a velocidade máxima foi corrigida dos efeitos de impedimento sólido e empuxo horizontal.

Em seguida foi levantada a incerteza da velocidade crítica ( $V_{crit}$ ), através da determinação das incertezas de cada variável envolvida na equação.

Calculou-se então a incerteza do incremento da velocidade ( $\Delta U$ ), como mostrado na TAB. 3.7. A única fonte de incerteza considerada foi a repetitividade e seu valor bruto é dado pelo desvio padrão dos incrementos dividido pela raiz do número de  $\Delta U$ .

TABELA 3.7

Levantamento de incertezas do incremento da velocidade ( $\Delta U$ )

Fontes de incerteza		Efeitos Sistemáticos		Efeitos aleatórios			
Símbolo	Descrição	correção (mm)	valor bruto (mm)	tipo de distribuição	Fator de abrangência ( $k$ )	$u$ (mm)	$\nu$
$RE$	Repetitividade	0	0,003	normal	1	0,003	19
$C_c$	Correção combinada	0					
$u_c$	Incerteza padrão combinada			normal		0,003	19
$U_{exp}$	Incerteza expandida			normal		0,006	

As outras variáveis envolvidas no cálculo da velocidade crítica são o incremento do tempo ( $t_i$ ) e o tempo de fadiga do peixe ( $t_f$ ). Assumiu-se que as incertezas das mesmas fossem iguais a 60 segundos, já que a marcação do tempo e mudança na velocidade foram feitas de forma manual.

Assim, utilizando a EQ. 3.12 obteve-se a seguinte igualdade para o cálculo da incerteza da velocidade crítica:

$$u(U_{crit}) = \sqrt{(u(U_{max}))^2 + \left(\frac{t_f}{t_i} u(\Delta U)\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{t_i} u(t_f)\right)^2 + \left(\frac{\Delta U t_f}{t_i^2} u(t_i)\right)^2} \quad \text{EQ. 3.12}$$

### Análise estatística

Para análise dos dados de velocidade crítica e prolongada foi utilizado o *software* STATISTICA. A principal ferramenta de teste foi a regressão múltipla linear, cujos coeficiente de regressão e nível de significância foram utilizados para julgamento do ajuste.

Para representação dos dados também foram utilizadas as ferramentas de Box-plot e histograma.

No caso da velocidade crítica, foram realizadas regressões múltiplas para as variáveis velocidade crítica corrigida, comprimento total (CT), comprimento padrão (CP), peso corporal (PC) e fator de condição ( $k$ ). Este último trata de uma relação entre o peso e comprimento total do peixe (EQ. 3.13):

$$k = \frac{PC}{CT^3} \quad \text{EQ. 3.13}$$

Na análise da velocidade prolongada, após a adimensiolização pelo comprimento total, as velocidades foram colocadas em ordem crescente e confeccionados os Box-plot múltiplos.

Para determinar a velocidade de transição entre o modo sustentável (tempo de fadiga > 200 minutos) e modo prolongado (tempo de fadiga < 200 minutos), calculou-se a média das velocidades apresentadas para o tempo de corte de 200 minutos.

Quanto à regressão realizada para tempo de fadiga e velocidade prolongada, optou-se por trabalhar com os tempos médios de fadiga para cada velocidade.

Finalmente, foram construídos gráficos para análise de percentual de peixes fadigados em relação ao tempo. Assim, de posse dos valores dos tempos organizados em ordem crescente, foram separados grupos de período de fadiga e feita análise da quantidade de peixes fadigados para cada valor desses tempos. Depois da construção desses gráficos, foram obtidos os tempos nos quais 50% dos peixes fadigavam para a velocidade da reta. Para isso foram utilizadas as equações obtidas com a regressão.

Os testes foram considerados significativos quando o nível de significância (P) eram menor que 0,05.

## **3.2 Adequação das escadas de slot vertical às características dos peixes neotropicais**

### **3.2.1. Dimensionamento de escadas do tipo slot vertical a partir de critérios natatórios considerando a capacidade de peixes neotropicais**

Para melhor analisar os dispositivos de transposição construídos no Brasil, optou-se por aplicar os critérios de projeto, propostos por Katopodis (1994) e Jones e colaboradores (1974), utilizando as curvas de velocidade crítica e prolongada obtidas para as três espécies testadas.

Com o objetivo de uma posterior comparação entre os projetos que levam em consideração as velocidades das espécies neotropicais e os que não as adotam, optou-se por utilizar as características da escada para peixes da UHE Igarapava como parâmetro para o dimensionamento.

Assim, como detalhado na revisão bibliográfica, foram calculadas as velocidades máximas de escoamento através de cada critério.

### **3.2.2. Avaliação das alterações nos parâmetros hidráulicos e construtivos das escadas de slot vertical considerando as algumas características dos peixes neotropicais**

Como explicado no capítulo 2, a abertura da ranhura ( $b_o$ ), altura da lâmina d'água ( $y_o$ ) e inclinação da escada ( $S_o$ ) são três variáveis hidráulicas que estabelecem, em uma escada para peixes, a vazão, a velocidade máxima e a dissipação de energia do sistema. Alterações nos valores dessas variáveis, principalmente na abertura e na inclinação, causam mudanças significativas nas características hidráulicas do canal e, conseqüentemente, nos custos construtivos.

De forma a quantificar estas mudanças, foram projetadas 7 escadas para vencer um desnível de 10 metros, onde foram atribuídos para  $b_o$  e  $S_o$  os valores mostrados na TAB. 3.8.

Normalmente os valores de largura e comprimento do slot são obtidos a partir da abertura da ranhura. Estas relações são propostas por alguns autores de forma a se obter uma dissipação satisfatória de energia. No entanto, como um dos objetivos do presente trabalho é avaliar o atendimento de uma escada brasileira às características dos peixes neotropicais, obteve-se por manter a relação, entre  $b_o$  e largura/comprimento do slot, observada na escada da UHE de Igarapava. Assim, utilizou-se das igualdades da EQ. 3.14 e 3.15.



TABELA 3.8

Cenários de Escadas do tipo slot vertical calculados

	Inclinação $S_o$ (m/m)	Abertura da ranhura $b_o$ (m)	Comprimento do slot -B (m)	Largura do slot L (m)	Comprimento da Escada (m)
1	0,14	0,40	3,2	3	71,43
2	0,1	0,40	3,2	3	100,00
3	0,08	0,40	3,2	3	125,00
4	0,06	0,40	3,2	3	166,67
5	0,06	0,60	4,8	4,5	166,67
6	0,06	0,30	2,4	2,3	166,67
7	0,06	0,15	1,2	1,1	166,67

$$L = 7,5b_o \quad \text{EQ. 3.14}$$

$$B = 8b_o \quad \text{EQ. 3.15}$$

Dessa forma, os comprimentos obtidos das escadas foram diferentes para cada um dos cenários estudados (TAB. 3.8).

Os valores da abertura da ranhura e da inclinação foram estabelecidos a partir das respectivas dimensões da escada da UHE de Igarapava ( $b_o = 0,40$  m e  $S_o = 0,06$  m/m). Procurou-se fixar uma das variáveis e alterar a outra.

Para avaliar as alterações nos custos, o volume da escada foi escolhido como parâmetro de análise. Utilizando-se do programa Autocad 2000, as escadas de cada cenário foram desenhadas em 3 dimensões e seus respectivos volumes obtidos através de uma ferramenta conhecida como *mass properties*.

Já para análise das variações nas características hidráulicas, escolheu-se a velocidade máxima do escoamento. Este parâmetro foi obtido através da EQ. 3.16, que relaciona o mesmo com a diferença de cotas entre os slots ( $\Delta h$ ).

$$\Delta h = \frac{V_{\max}^2}{2g} \quad \text{EQ. 3.16}$$

### 3.2.3. Simulação numérica e obtenção dos caminhos preferenciais para peixes neotropicais

Objetivando encontrar os possíveis caminhos, ou áreas, a serem utilizados pelos peixes neotropicais dentro de uma escada do tipo slot vertical, foram realizadas algumas simulações numéricas com o software Flow3D produzido pela FlowScience.

Para a solução das equações de Navier-Stokes, o algoritmo deste programa aplica o método das diferenças finitas na malha representativa da geometria a ser estudada. Os elementos base dessa malha são hexágonos com lados variáveis.

Como explicado no capítulo anterior, a análise de escoamentos livres é muito complexa e várias são as aproximações numéricas utilizadas para estudo deste tipo de situação. No caso do software Flow3D, o método VOF (Volume – of – Fluid Method) é empregado para definir a linha d'água, ou seja, os pontos de interação do ar com a água.

Quanto ao modelo de turbulência, optou-se por utilizar o RNG (Renormalization-Group methods). Este modelo utiliza equações similares ao modelo K-ε. Entretanto, as constantes dessas equações, que são encontradas de forma empírica neste último modelo, são obtidas de forma explícita no modelo RNG.

A simulação de cada cenário foi dividida em 2 fases diferentes (FIG. 3.27). Na primeira fase, o fluido era confinado entre duas paredes virtuais e a gravidade decomposta na direção z e x. Isso permitia a obtenção de uma lâmina d'água paralela de forma mais rápida (situação intermediária mostrada na FIG. 3.27).

Na segunda fase, a direção da gravidade era então corrigida e as paredes virtuais eram retiradas, alterando assim as condições de contorno.

Este procedimento permite a criação do chamado transiente numérico cujo momento inicial se caracteriza por ser uma situação virtual (a retirada das paredes neste caso).

A simulação era rodada até a convergência do modelo, verificada através de gráficos, fornecidos pelo software, sobre turbulência, RMS entre outros parâmetros.

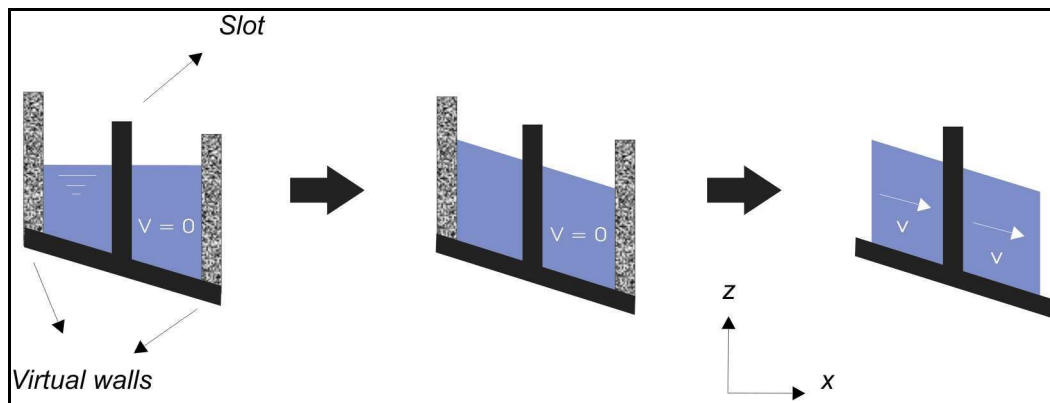


FIGURA 3.27- Fases da simulação

Para verificar a validade dos dados obtidos, através de métodos numéricos, comparou-se estes últimos com os medidos no protótipo por Viana (2005). A primeira avaliação consistiu em verificar a vazão dentro da escada. Assim, a TAB. 3.9 mostra as vazões encontradas pela simulação em várias seções transversais e em tempos variados.

TABELA 3.9 – Valores encontrados pela simulação numérica

Tempo (s)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)		
	Seção		
	1	30	60
0	1,81	1,70	1,83
1	1,67	1,73	1,66
2	1,68	1,73	1,67
3	1,73	1,70	1,73
4	1,88	1,73	1,86
5	1,78	1,70	1,78

A média das vazões, fornecida pela simulação, foi 1,74 m<sup>3</sup>/s enquanto no protótipo foi de 1,56 m<sup>3</sup>/s (Viana, 2005), o que representa uma diferença de 10% em relação a vazão média simulada.

A segunda verificação consistiu na comparação de alguns perfis do campo de velocidade paralelos ao fundo da escada (FIG. 3.28). Os maiores valores de velocidade (média) obtidos por Faria (2005) não passaram de 2,5m/s. Como verificado na FIG. 3.8, a simulação numérica forneceu velocidades próximas às medidas no protótipo. Com resultado da simulação é possível perceber que o fluxo principal dentro da escada apresenta velocidades entre 1.0 e 2.6 m/s.

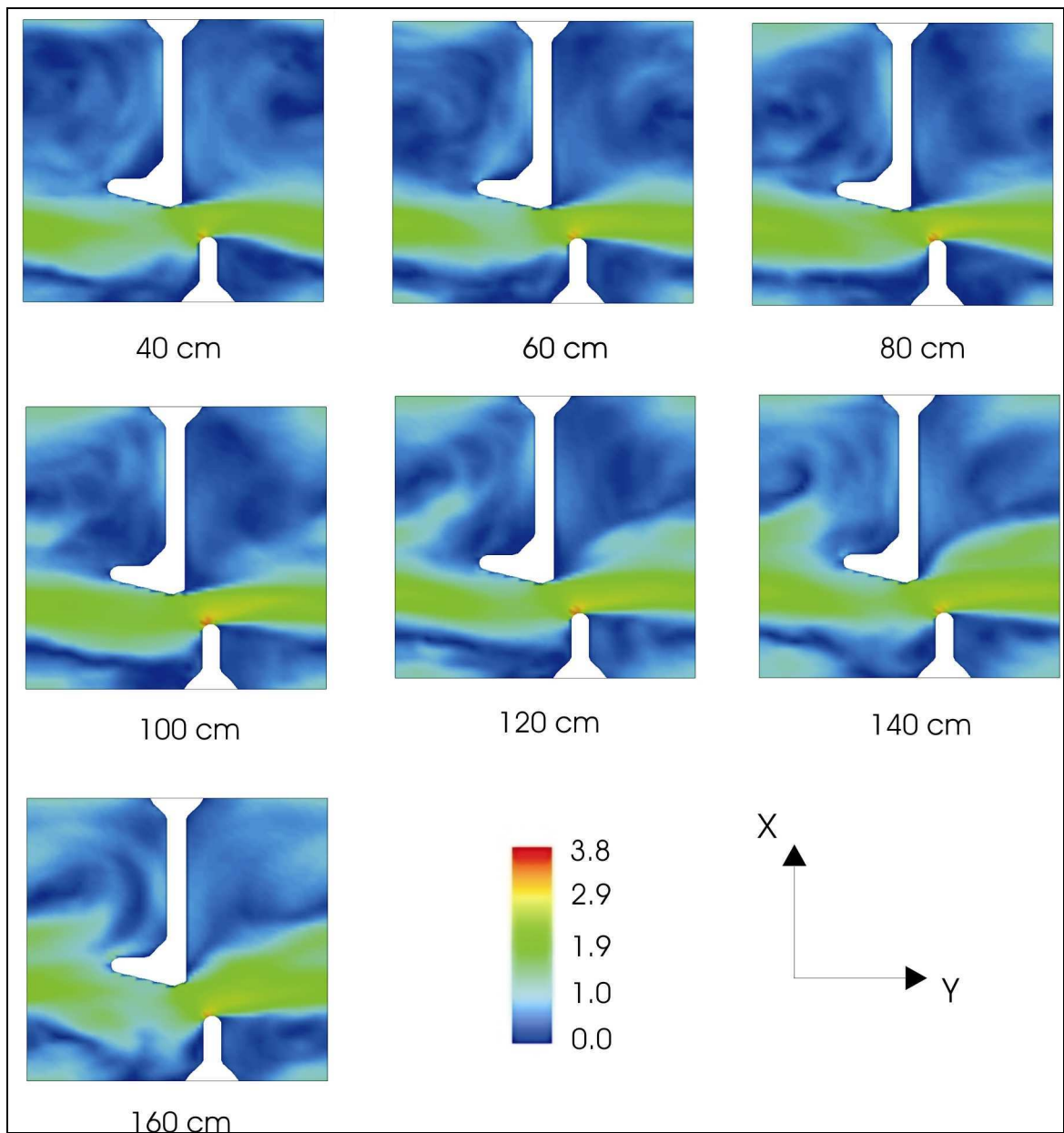


FIGURA 3.28- Campo de velocidade obtidos para altura de 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 cm do fundo do canal.

Análise dos resultados da simulação consistiu na obtenção de barreiras de velocidade, dentro dos perfis longitudinais (paralelo ao fundo da escada) e transversais (perpendicular ao escoamento) como mostrado na FIG. 3.29. Essas barreiras são áreas aonde o peixe deve utilizar um determinado tipo de velocidade natatória para conseguir realizar a passagem.

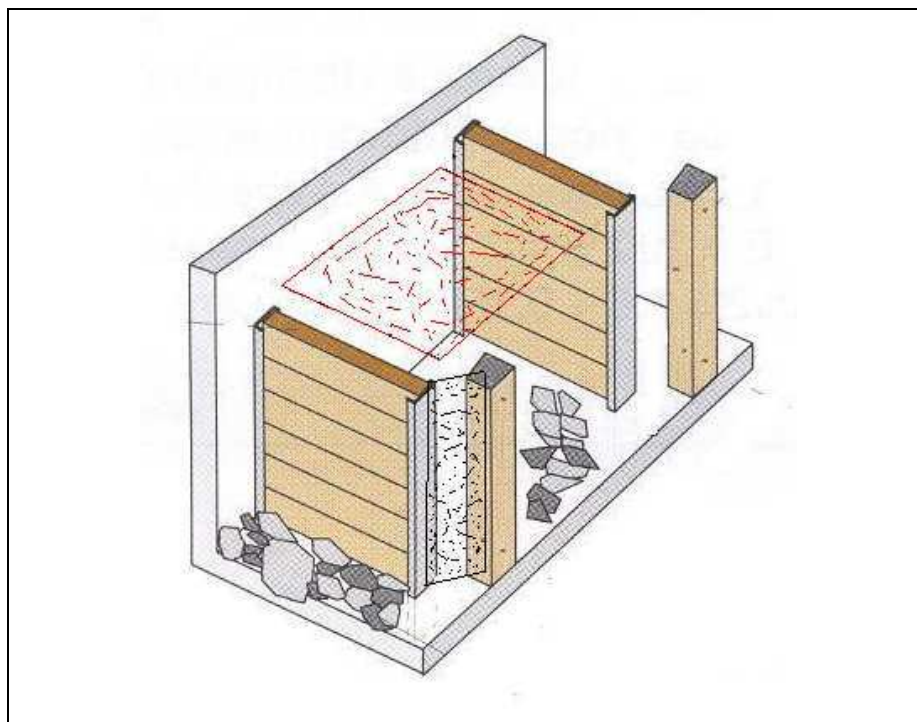


FIGURA 3.29- Plano transversal (preto) e plano longitudinal (vermelho)

Dessa forma, a análise das velocidades foi bi-dimensional, ou seja, foram consideradas as resultantes das velocidades no plano paralelo ao fundo da escada. O eixo considerado é mostrado na FIG 3.28.

Para simulação, utilizou-se o nível d'água igual 1,9 metros. Este valor é a profundidade normal da escada obtida no projeto de dimensionamento.

A geometria dentro da escada foi representado por uma malha cuja menor unidade (célula) tinha 4 cm de largura, 4 cm de comprimento e 4 cm de altura.

O escoamento dentro da escada foi simulado pra um tempo de 1 minuto, sendo que cada interação era realizada a 0,01 segundo. Depois finalizada a simulação, escolheu-se uma janela de tempo de 5 segundos, para análise dos dados, após a convergência do modelo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Capacidade natatória

#### 4.1.1. Velocidade Crítica

Em todos os ensaios de velocidade crítica observou-se a manutenção satisfatória dos padrões físico-químicos da água utilizada nos testes. Para as três espécies testadas as concentrações de oxigênio dissolvido estiveram sempre em valores superiores a 5 mg/l, e na maioria dos testes entre 7 e 8 mg/l (FIG. 4.1). A concentração deste elemento variou significativamente com o aumento da temperatura e com o aumento da velocidade dentro do aparato (FIG. 4.2 e TAB. 4.1). A temperatura da água ao longo dos ensaios variou de 25 a 28 °C (FIG. 4.3) e o pH entre 7,3 e 7,9 (FIG 4.4).

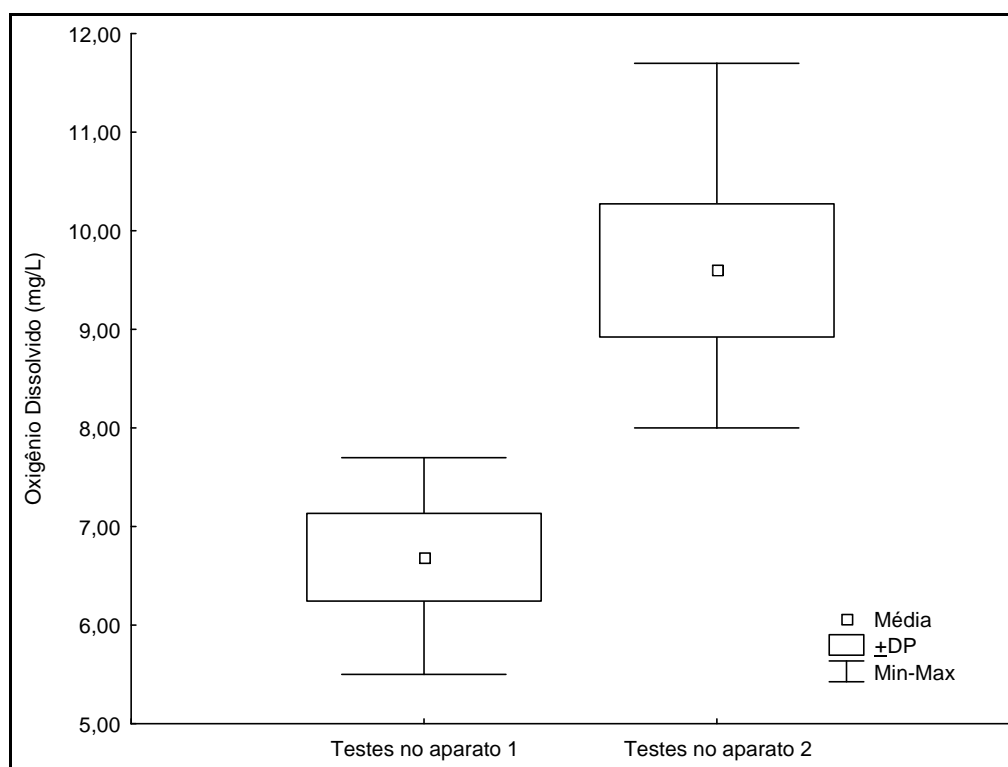


FIGURA 4.1- Box plot de oxigênio dissolvido.

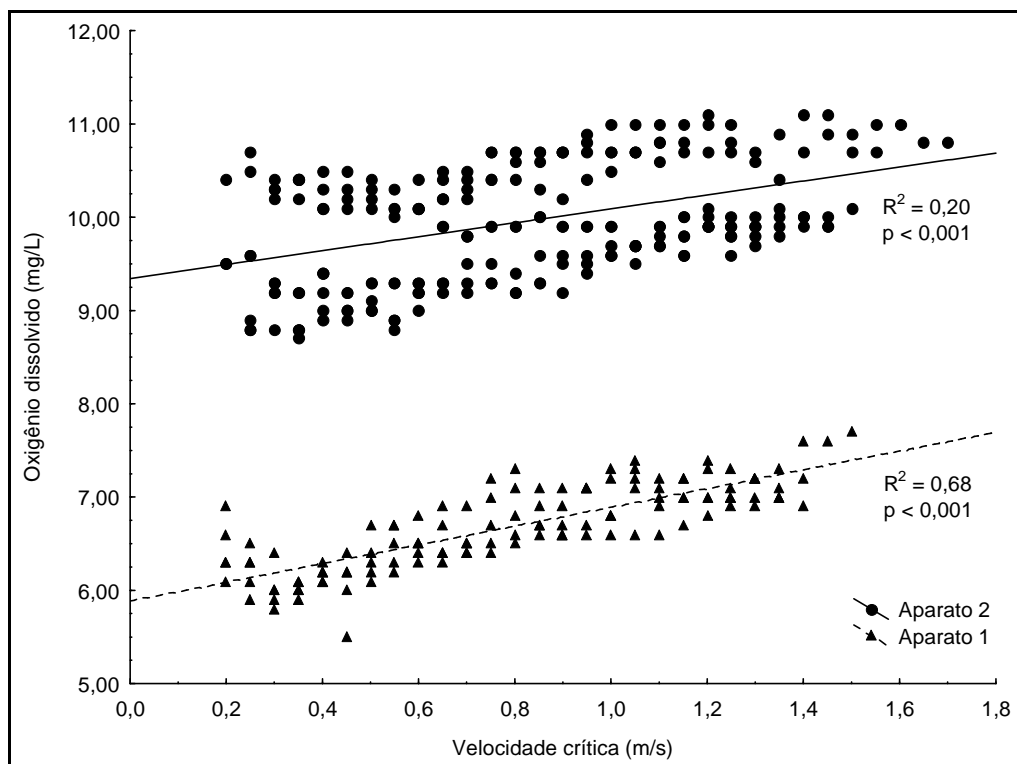


FIGURA 4.2- Oxigênio Dissolvido x Velocidade Crítica para os dois aparatos.

TABELA 4.1

Regressão linear do Oxigênio Dissolvido x Velocidade Crítica

	Intercepto	Fator condição
<b>Beta</b>		0,8216
<b>Erro do Beta</b>		0,0514
<b>B</b>	5,8838	1,0057
<b>Erro Padrão</b>	0,0553	0,0629
<b>t(22)</b>	106,3382	15,9857
<b>p-valor</b>	0,0000	0,0000
<b>R</b>		0,1816
<b>R<sup>2</sup></b>		0,675
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,6724
<b>N</b>		125
<b>p-valor</b>		< 0,001

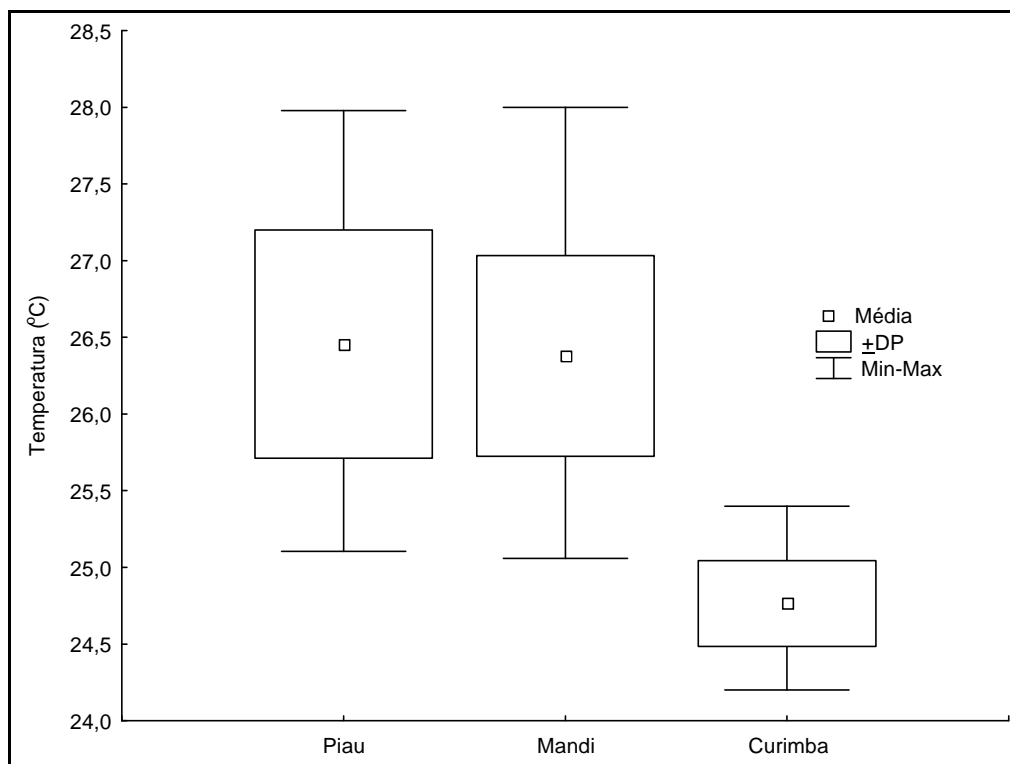


FIGURA 4.3 – Variações de temperatura nos ensaios de velocidade crítica.

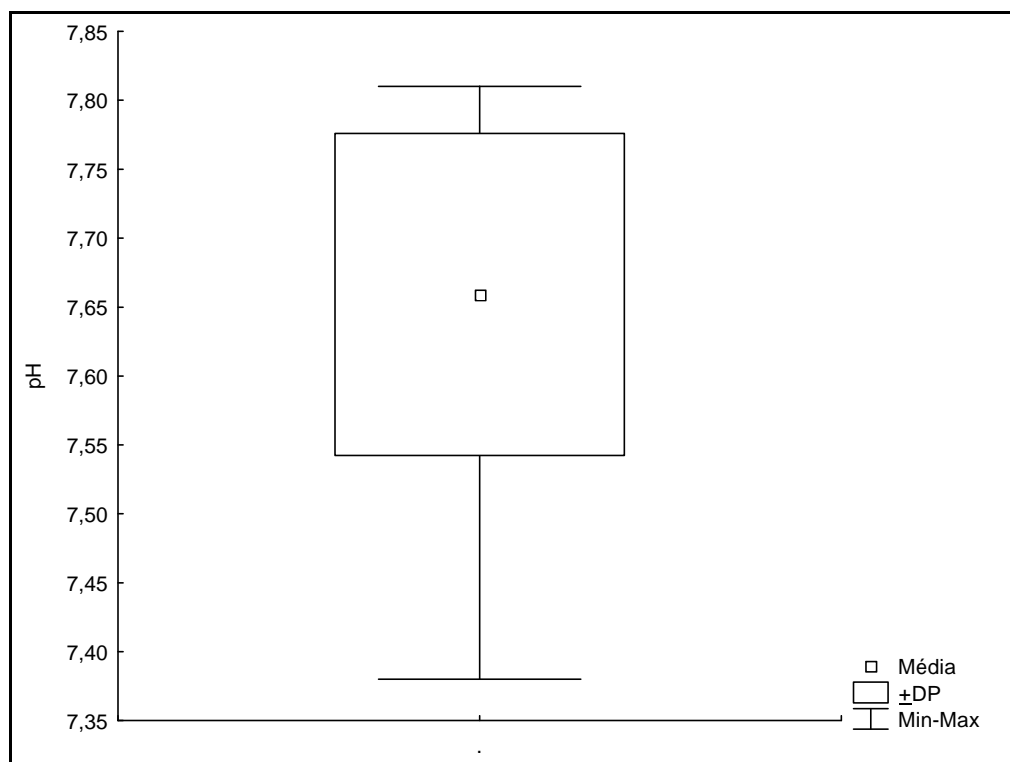


FIGURA 4.4- pH dos ensaios de velocidade crítica.

Para cada uma das espécies procurou-se distribuir equitativamente o número de indivíduos testados por cada classe de tamanho, sendo que para o mandi o tamanho dos exemplares



testados variou de 19 a 26 cm (FIG 4.5), para o piaú de 12,5 a 17,5 cm (FIG 4.6) e para a curimba de 26,5 a 38 cm (FIG. 4.7).

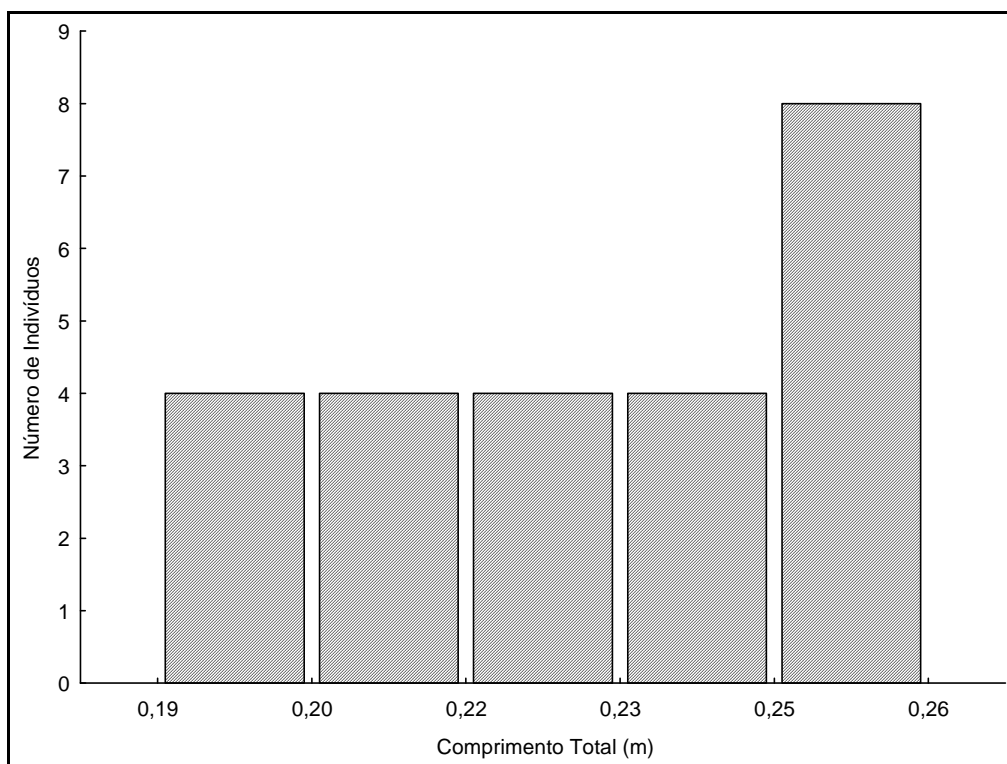


FIGURA 4.5- Classe de tamanho para o mandi.

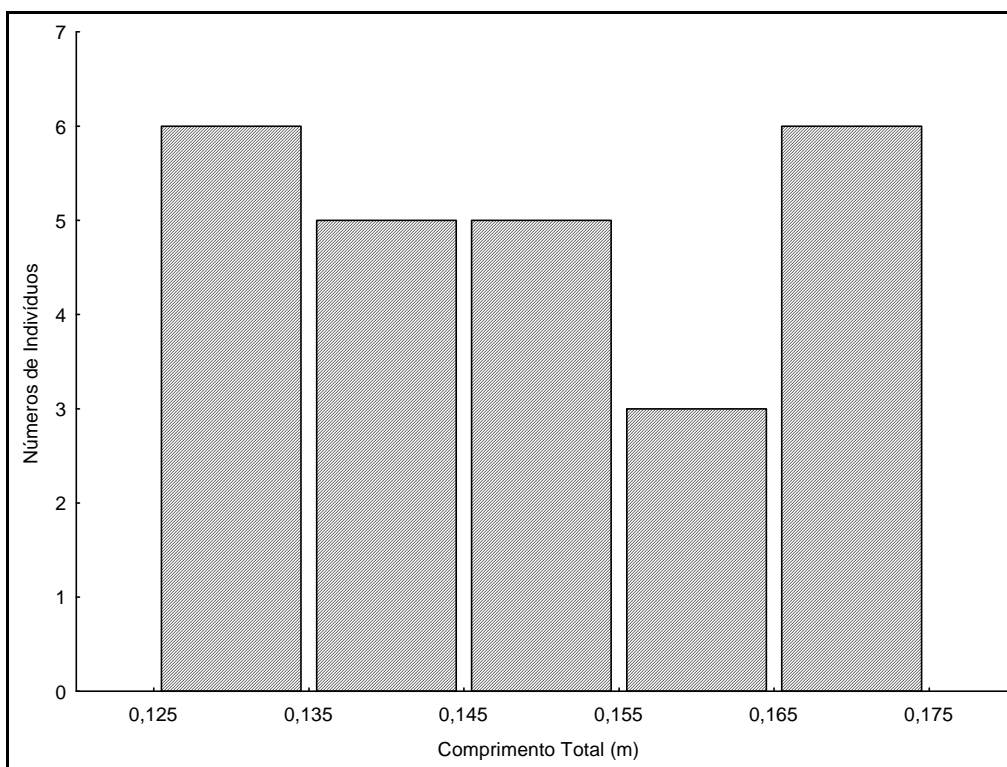


FIGURA 4.6- Classe de tamanho para o piaú.

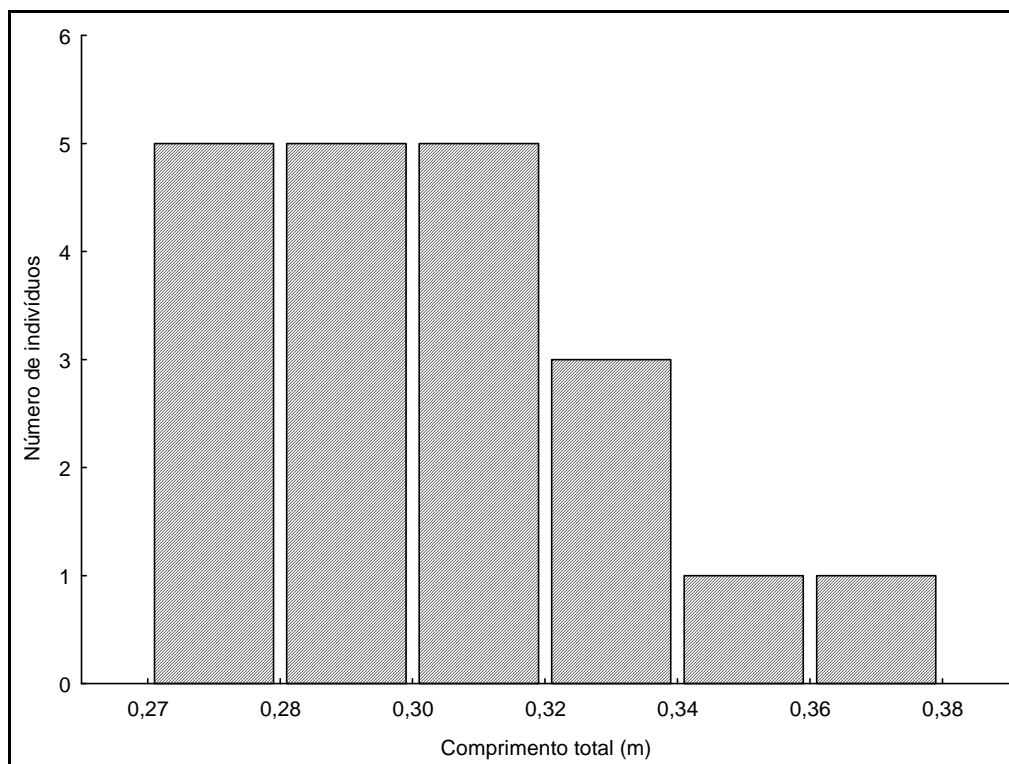


FIGURA 4.7- Classe de tamanho para a curimba.

Para as três espécies, observaram-se relações significativas entre a velocidade crítica e os comprimentos totais e padrão e o peso corporal. O comprimento total foi a variável com maior poder explicativo para a velocidade crítica, seguida do comprimento padrão e o peso (FIG. 4.8, 4.9 e 4.10). Para todas estas relações, fica clara a maior velocidade crítica do piau em relação ao mandi e a curimba, para um mesmo comprimento padrão. Percebe-se também que termos relativos, isto é, dividindo a velocidade absoluta pelo comprimento, a curimba apresenta velocidade crítica inferior à do mandi.

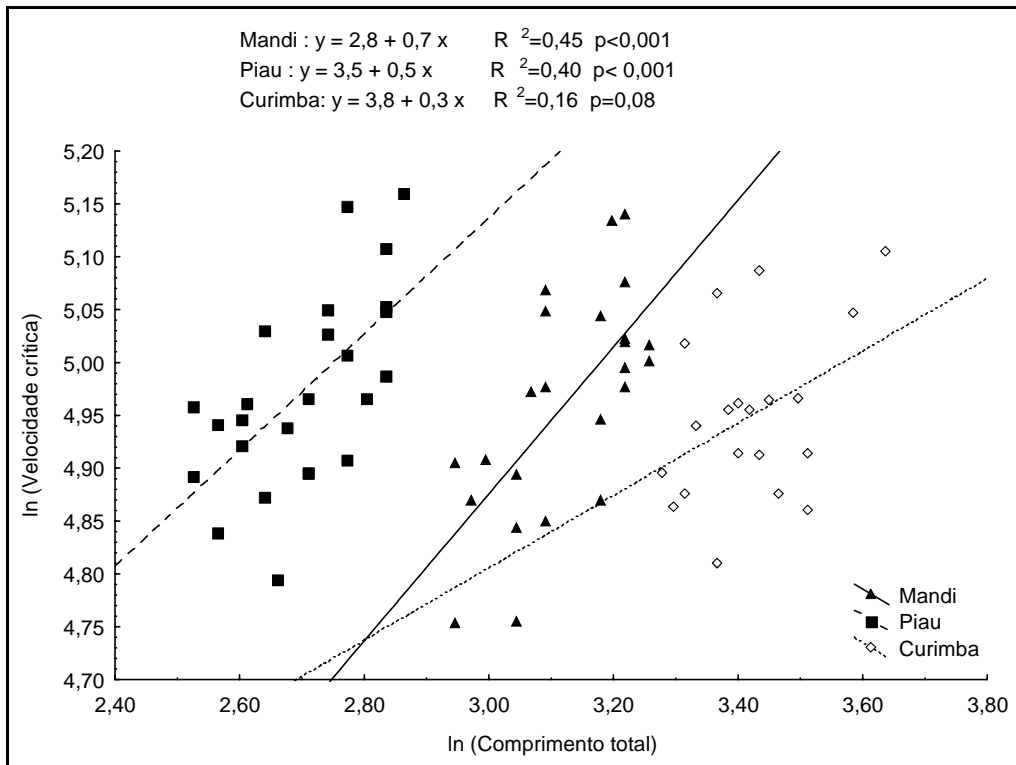


FIGURA 4.8- Ln (Velocidade crítica em cm/s) x Ln (Comprimento total em cm).

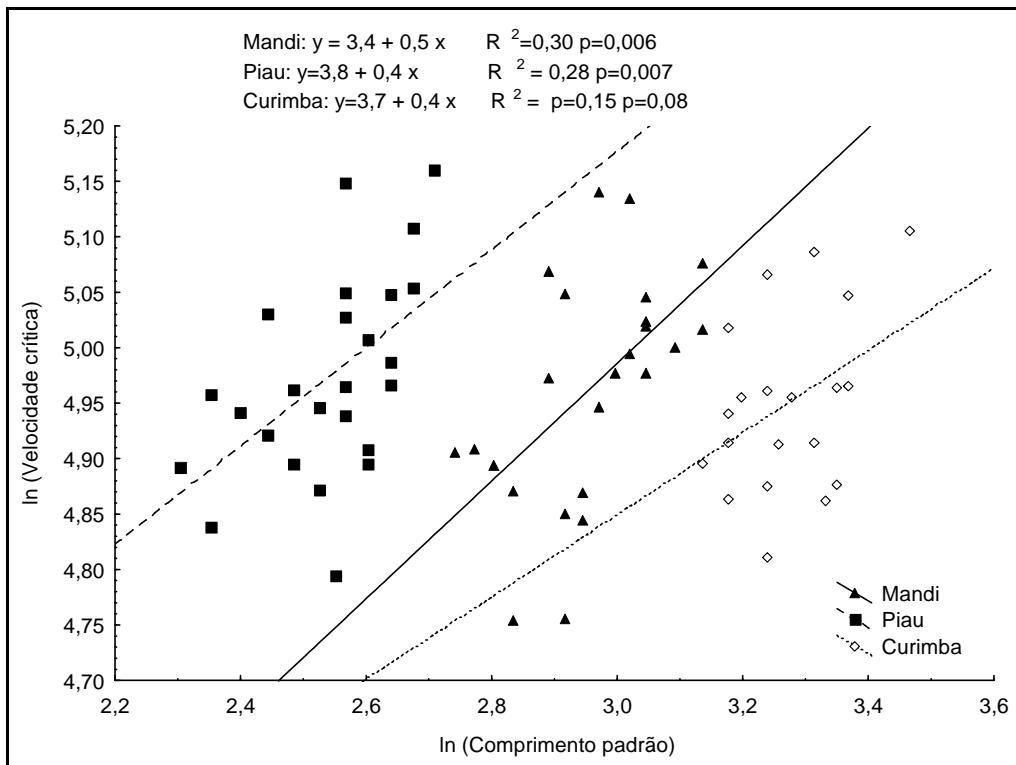


FIGURA 4.9- Ln (Velocidade crítica em cm/s) x Ln (Comprimento padrão em cm).

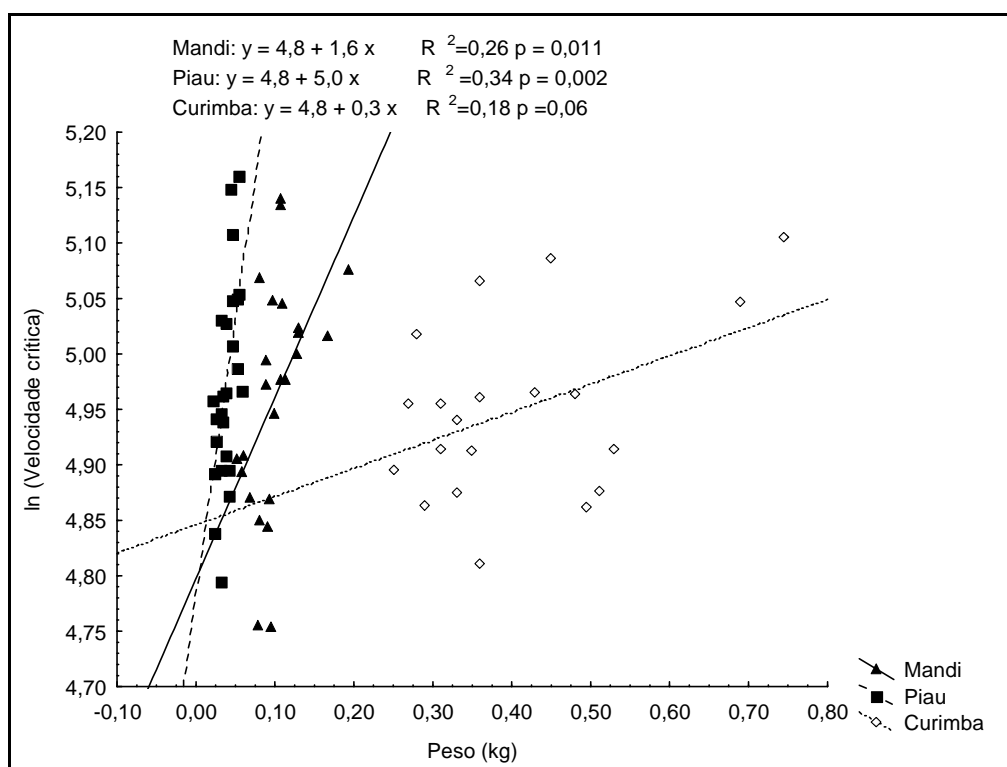


FIGURA 4.10- Ln (Velocidade crítica em cm/s) x (Peso).

A velocidade crítica, por outro lado, não apresentou relação significativa com o fator de condição para as três espécies (TAB. 4.2, TAB. 4.3 e TAB. 4.4). Já a temperatura explicou significativamente a velocidade crítica apenas para o piau (TAB. 4.5, TAB. 4.6 e TAB. 4.7), acrescentando poder explicativo para o modelo desta espécie (TAB. 4.8 e 4.9).

TABELA 4.2

Regressão linear de Ln (Velocidade crítica em cm/s) x Fator de condição ( $\text{kg/m}^3$ ) para o mandi

	Intercepto	Fator condição
<b>Beta</b>		-0,2234
<b>Erro do Beta</b>		0,2078
<b>B</b>	5,0666	-0,1252
<b>Erro Padrão</b>	0,0996	0,1165
<b>t(22)</b>	50,8619	-1,0748
<b>p-valor</b>	0,0000	0,2941
<b>R</b>		0,2233
<b>R<sup>2</sup></b>		0,0499
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,0067
<b>N</b>		24
<b>p-valor</b>		0,2941

TABELA 4.3

Regressão linear de ln (Velocidade crítica em cm/s) x Fator de condição ( $\text{kg/m}^3$ ) para o piau

	<b>Intercepto</b>	<b>Fator condição</b>
<b>Beta</b>		-0,2407
<b>Erro do Beta</b>		0,2024
<b>B</b>	5,1397	-0,1492
<b>Erro do B</b>	0,1415	0,1254
<b>t(23)</b>	36,3336	-1,1895
<b>p-valor</b>	0,0000	0,2464
<b>R</b>		0,2407
<b>R<sup>2</sup></b>		0,0580
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,1699
<b>N</b>		25
<b>p-valor</b>		0,2464

TABELA 4.4

Regressão linear de ln (Velocidade crítica em cm/s) x Fator de condição ( $\text{kg/m}^3$ ) para a curimba

	<b>Intercepto</b>	<b>Fator condição</b>
<b>Beta</b>		-0,0018
<b>Erro do Beta</b>		0,2357
<b>B</b>	4,9507	-0,0001
<b>Erro do B</b>	0,1623	0,0118
<b>t(20)</b>	30,4963	-0,0077
<b>p-valor</b>	0,0000	0,9939
<b>R</b>		0,0018
<b>R<sup>2</sup></b>		0,0000
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		-
<b>N</b>		20
<b>p-valor</b>		0,9939

TABELA 4.5

Regressão linear de  $\ln$  (Velocidade crítica em cm/s) x  
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para o mandi

	<b>Intercepto</b>	<b>Fator condição</b>
<b>Beta</b>		0,2956
<b>Erro do Beta</b>		0,2037
<b>B</b>	3,7098	0,0475
<b>Erro do B</b>	0,8630	0,0327
<b>t(22)</b>	4,2986	1,4514
<b>p-valor</b>	0,0003	0,1608
<b>R</b>		0,2956
<b>R<sup>2</sup></b>		0,0874
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,0459
<b>N</b>		24
<b>p-valor</b>		0,1608

TABELA 4.6

Regressão linear de  $\ln$  (Velocidade crítica em cm/s) x  
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para a curimba

	<b>Intercepto</b>	<b>Fator condição</b>
<b>Beta</b>		0,1874
<b>Erro do Beta</b>		0,2315
<b>B</b>	3,6106	0,0541
<b>Erro do B</b>	1,6543	0,0668
<b>t(23)</b>	2,1825	0,8093
<b>p-level</b>	0,0426	0,4289
<b>R</b>		0,1873
<b>R<sup>2</sup></b>		0,0351
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		-
<b>N</b>		20
<b>P-valor</b>		0,0814

TABELA 4.7

Regressão linear de ln (Velocidade crítica em cm/s) x  
Temperatura (°C) para o piau

	<b>Intercepto</b>	<b>Fator condição</b>
<b>Beta</b>		0,4654
<b>Erro do Beta</b>		0,1846
<b>B</b>	3,4674	0,0569
<b>Erro do B</b>	0,5972	0,0226
<b>t(23)</b>	5,8064	2,5219
<b>p-level</b>	0,0000	0,0191
<b>R</b>		0,4654
<b>R<sup>2</sup></b>		0,2166
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,1826
<b>N</b>		25
<b>P-valor</b>		0,0191

TABELA 4.8

Regressão múltipla de ln (Velocidade crítica em cm/s) x  
Temperatura (°C) x ln (Comp. Total em cm) para o piau

	<b>Intercepto</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Comp. Total</b>
<b>Beta</b>		0,2993	0,5369
<b>Erro do Beta</b>		0,1621	0,1621
<b>B</b>	2,7398	0,0366	0,4682
<b>Erro do B</b>	0,5450	0,0198	0,1414
<b>t(22)</b>	5,0270	1,8466	3,3118
<b>p-valor</b>	0,0000	0,0783	0,0032
<b>R</b>		0,6908	
<b>R<sup>2</sup></b>		0,4772	
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,4297	
<b>N</b>		25	
<b>p-valor</b>		0,0008	

TABELA 4.9

Regressão múltipla de  $\ln$  (Velocidade crítica em cm/s) x  
 Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) x  $\ln$  (Comp. Padrão em cm) para o piau

	<b>Intercepto</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Comp. Padrão</b>
<b>Beta</b>		0,3428	0,4293
<b>Erro do Beta</b>		0,1744	0,1744
<b>B</b>	2,9493	0,0419	0,3604
<b>Erro do B</b>	0,5802	0,0213	0,1464
<b>t(22)</b>	5,0837	1,9659	2,4620
<b>p-valor</b>	0,0000	0,0621	0,0221
<b>R</b>		0,6212	
<b>R<sup>2</sup></b>		0,3858	
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,3300	
<b>N</b>		25	
<b>p-valor</b>		0,0047	

Quando comparadas com as demais espécies para as quais se encontram disponíveis dados a cerca da velocidade crítica, observa-se que as três espécies testadas apresentam para um mesmo comprimento, velocidade bem superior (FIG. 4.11). É importante ressaltar que as curvas obtidas para os peixes de clima temperado mostradas na FIG. 4.11 utilizam o comprimento furcal. Assim, como não foi coletado esse comprimento para o piau e para o mandi, utilizou-se nesse gráfico o comprimento médio entre o total e o padrão. Porém, quando se utiliza a equação obtida para a relação entre a velocidade crítica do piau para o comprimento total e a temperatura, para obter-se uma projeção das velocidades desenvolvidas por esta espécie para temperaturas inferiores, observa-se uma aproximação dos valores desenvolvidos pelo *Oncorhynchus nerka* para este mesmo rol de temperaturas (FIG. 4.12).



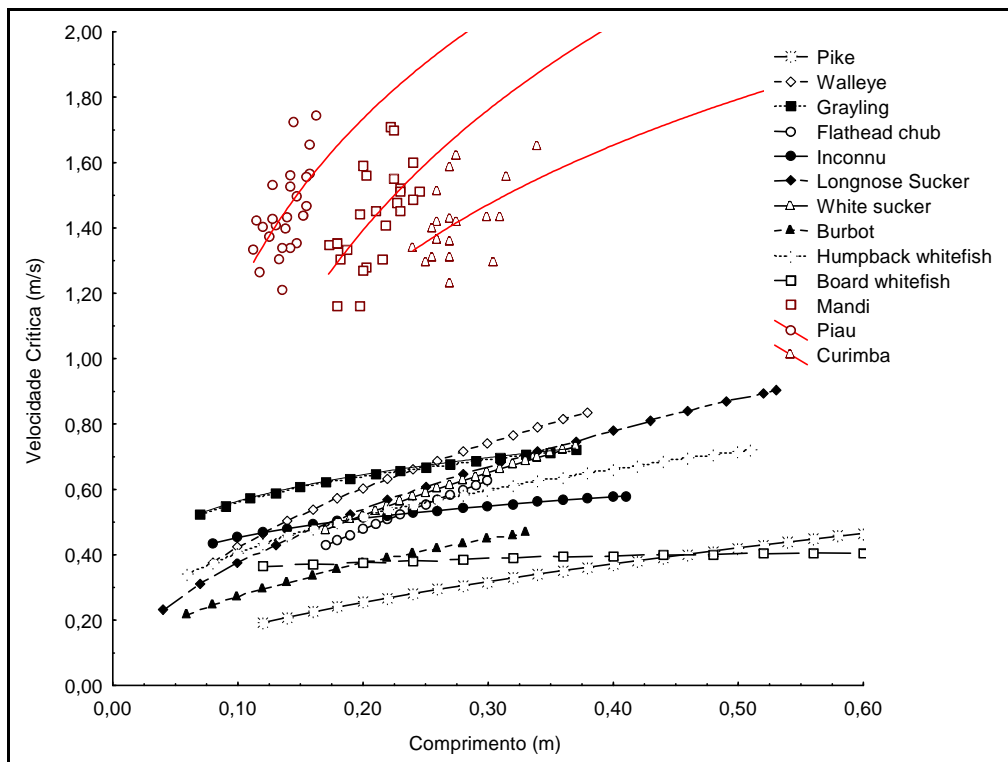


FIGURA 4.11- Curvas de Velocidade crítica x Comprimento para espécies neotropicais e as encontradas em clima temperado.

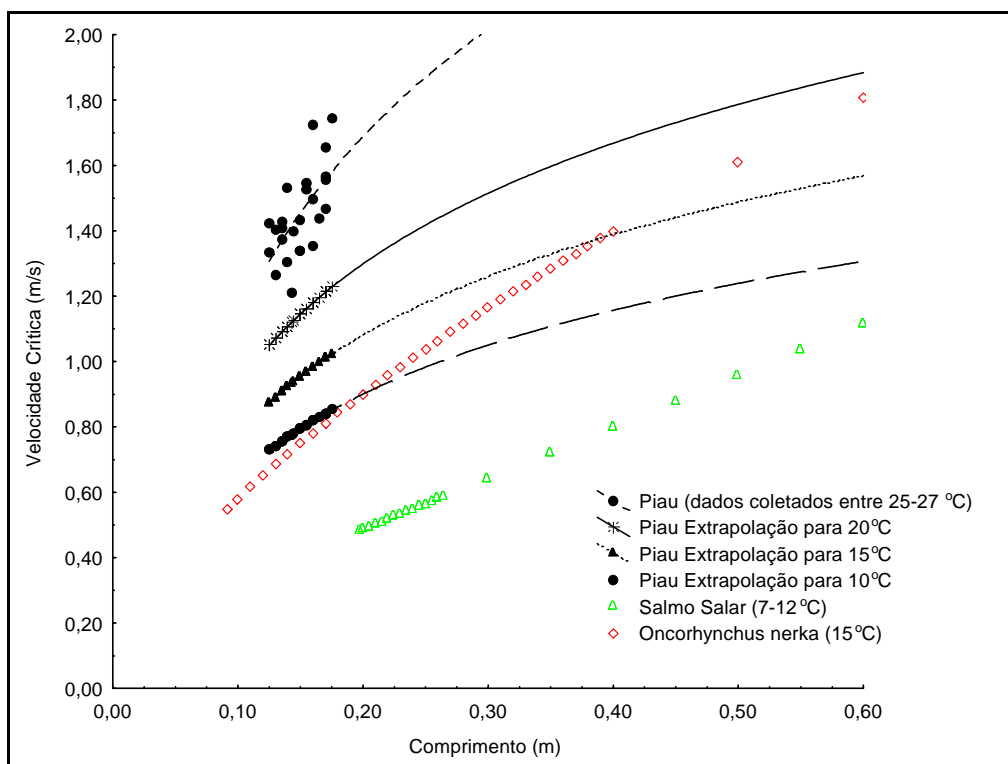


FIGURA 4.12- Curvas de Velocidade crítica x Comprimento para espécies o piau em diferentes temperaturas e os salmonídeos (*Salmo Salar* e *Oncorhynchus nerka*).

Como a obstrução do escoamento pelo peixe dentro do aparato é um fato considerado na correção da velocidade crítica, a FIG. 4.13 mostra a porcentagem da área transversal da seção de teste obstruída para as duas espécies. Observa-se que área frontal do peixe nunca foi maior do 14% da seção do aparato.

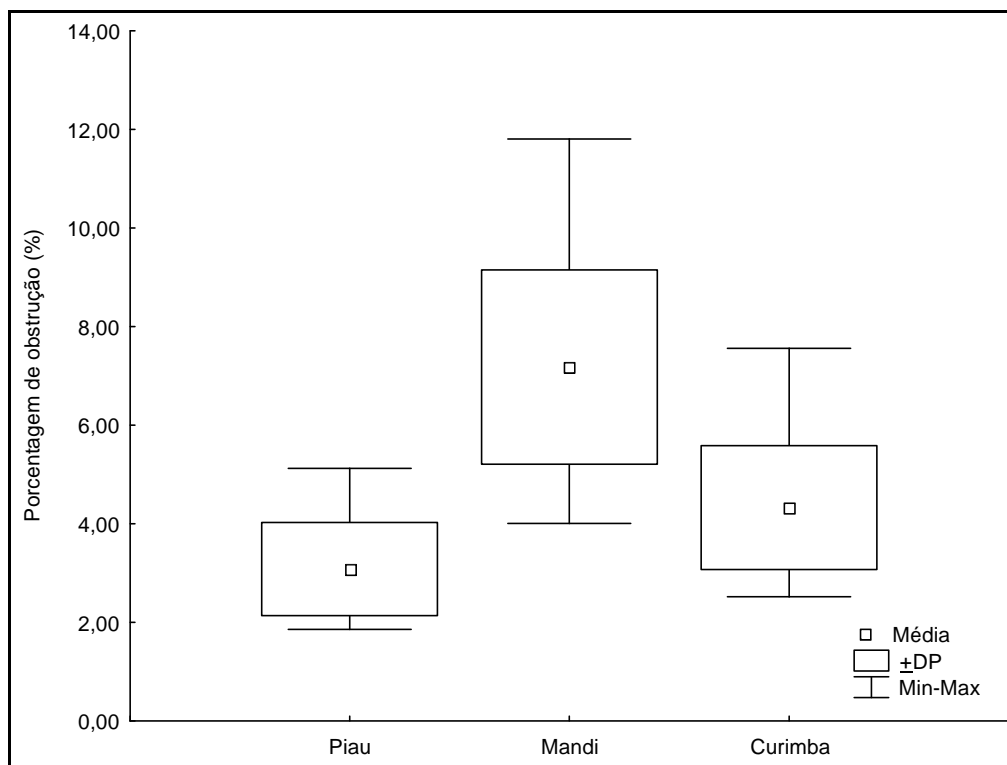


FIGURA 4.13- Obstrução do escoamento pelo peixe.

Outro fato importante de se considerar é a pressão gerada pelas bombas centrífugas. Por se tratar de um conduto forçado, o aparato força os peixes a nadarem no escoamento pressurizado. A FIG. 4.14 mostra a variação da pressão nos ensaios para cada uma espécie. Os testes da curimba, realizados no aparato de DN 250 mm, foram os que apresentaram menor variação de pressão. Isto se deve à característica das bombas centrífugas, que recalcam grande vazão com pequena pressão. As FIG. 4.15 e 4.16 mostram as variações de pressão a montante e jusante da seção de teste, respectivamente, nos ensaios realizados no aparato experimental de DN 150mm, tanto com piau como o mandi. A pressão máxima nunca passou de 0,24 kgf/cm<sup>2</sup> (2,4 mca) e a média esteve entre 0,12 e 0,16 kgf/cm<sup>2</sup> (1,2 e 1,6 mca respectivamente).

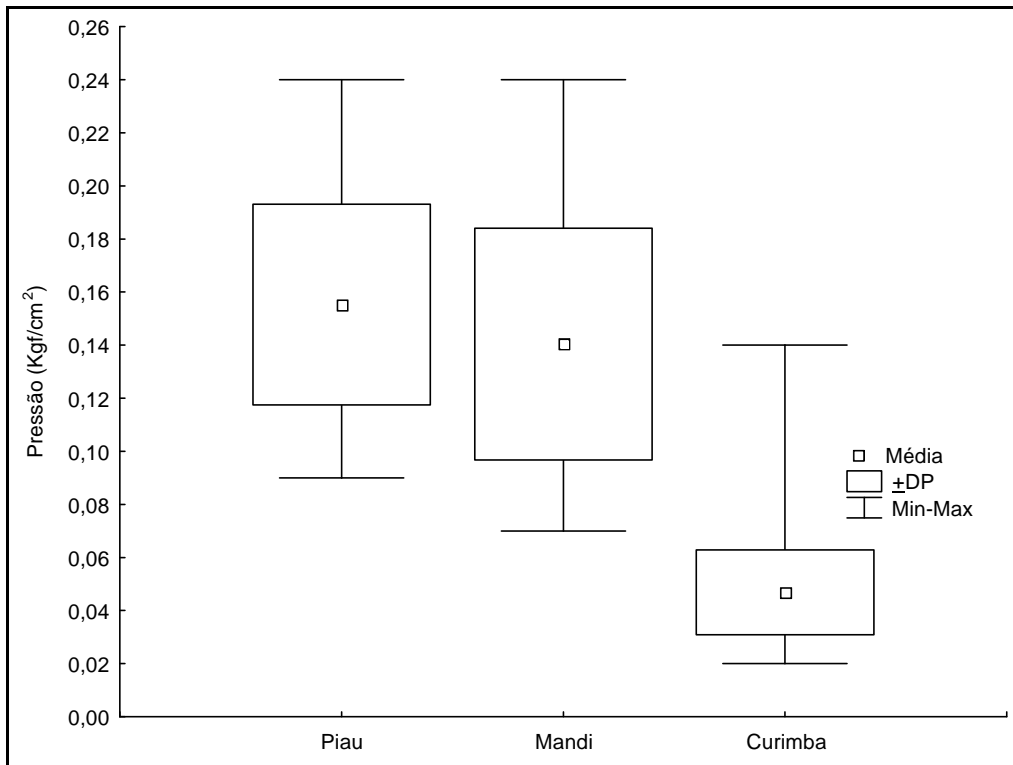


FIGURA 4.14- Box-plot da pressão à montante da seção de teste.

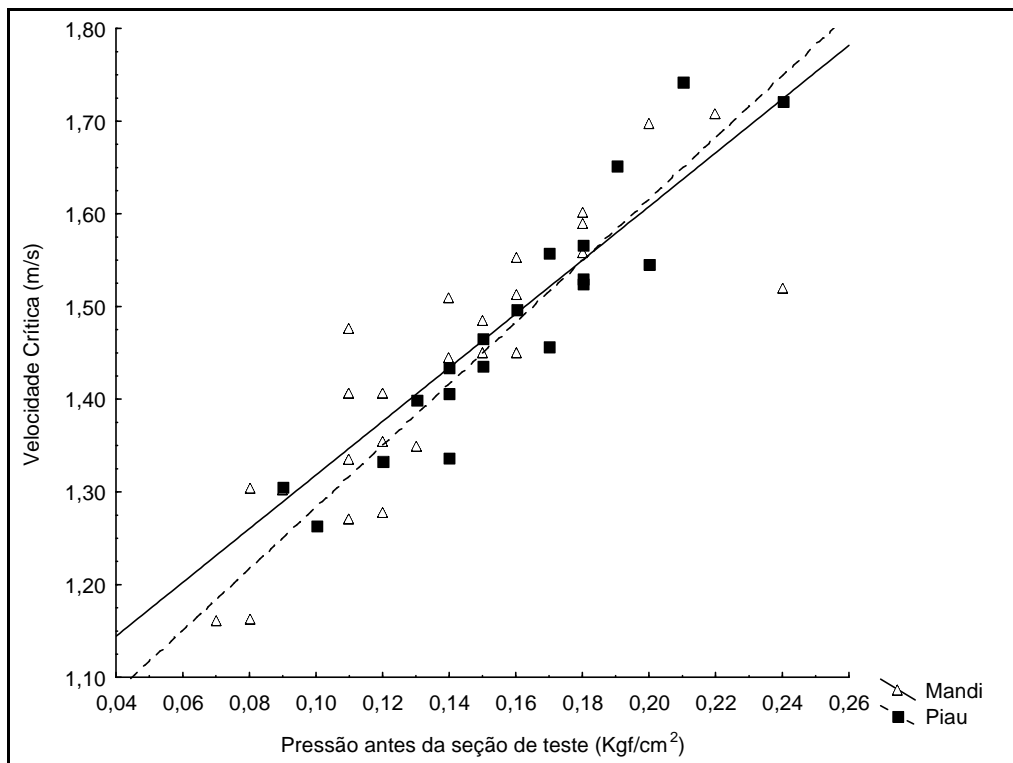


FIGURA 4.15- Gráfico da velocidade crítica x pressão à montante da seção de teste do aparato de DN 150mm.

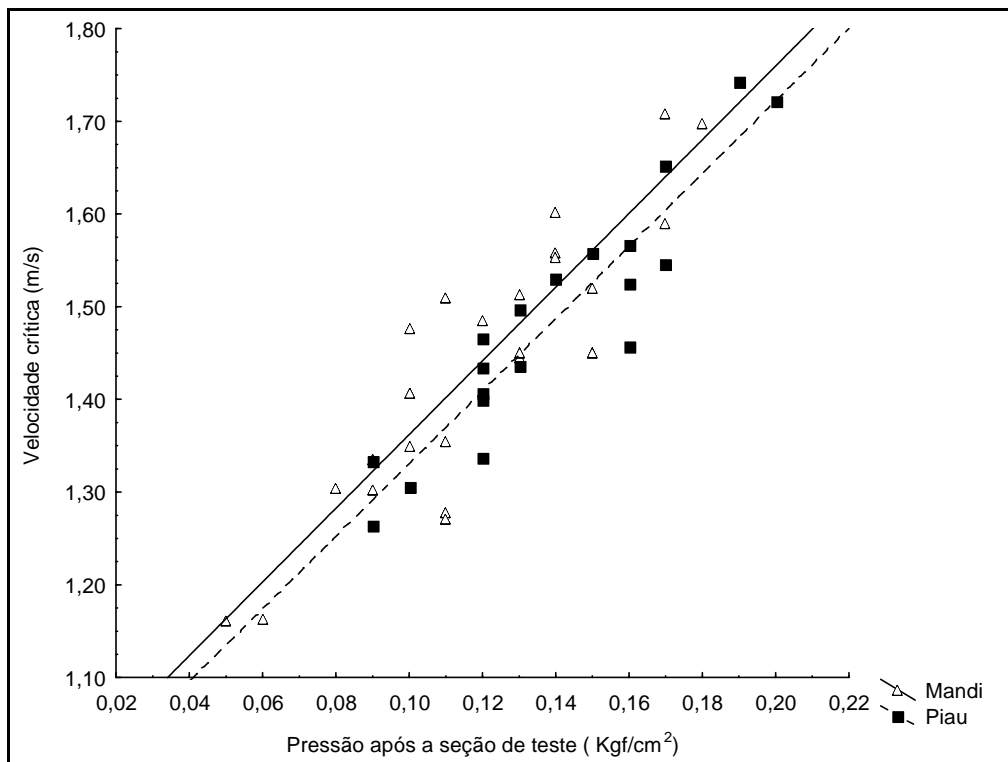


FIGURA 4.16- Gráfico da velocidade crítica x pressão à jusante da seção de teste do aparato de DN 150mm.

#### 4.1.2. Velocidade prolongada

Também em todos os ensaios de velocidade prolongada observou-se a manutenção satisfatória dos padrões físico-químicos da água utilizada nos testes. Para as duas espécies testadas as concentrações de oxigênio dissolvido estiveram sempre em valores superiores a 5 mg/l, e na maioria dos testes entre 7 e 8 mg/l (FIG. 4.17). A temperatura da água ao longo dos ensaios variou de 24 a 29 °C (FIG. 4.18). Os valores de pH sempre estiveram próximos a 7,5.

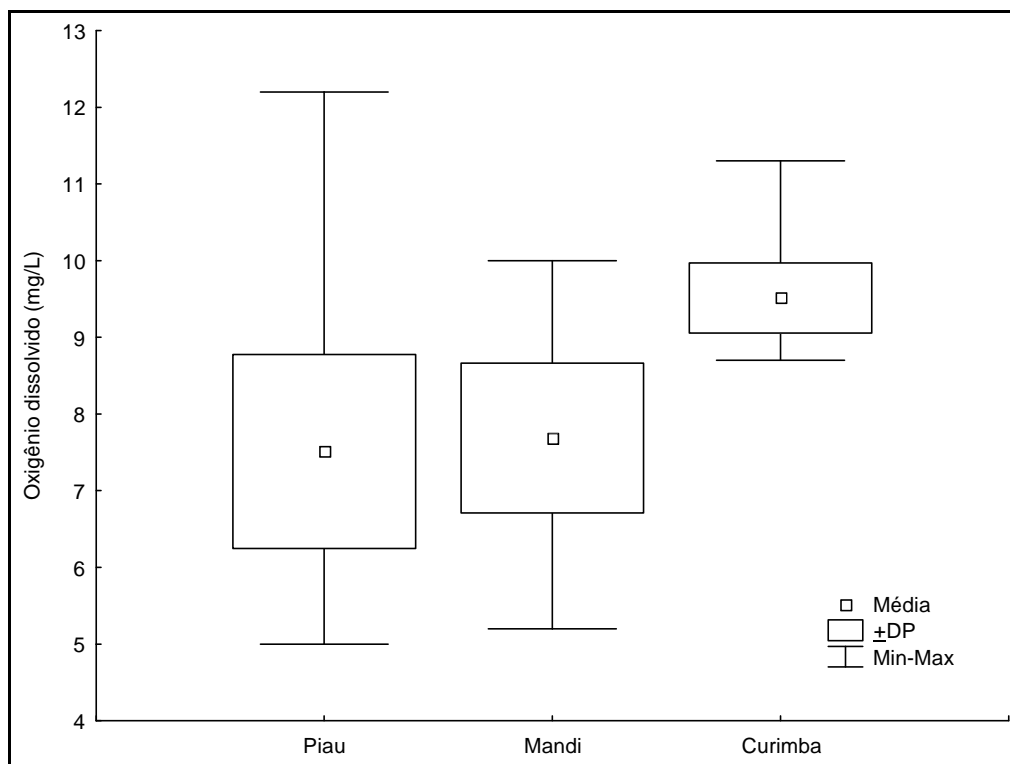


FIGURA 4.17- Oxigênio dissolvido medido nos ensaios de velocidade prolongada para o piau e o mandi.

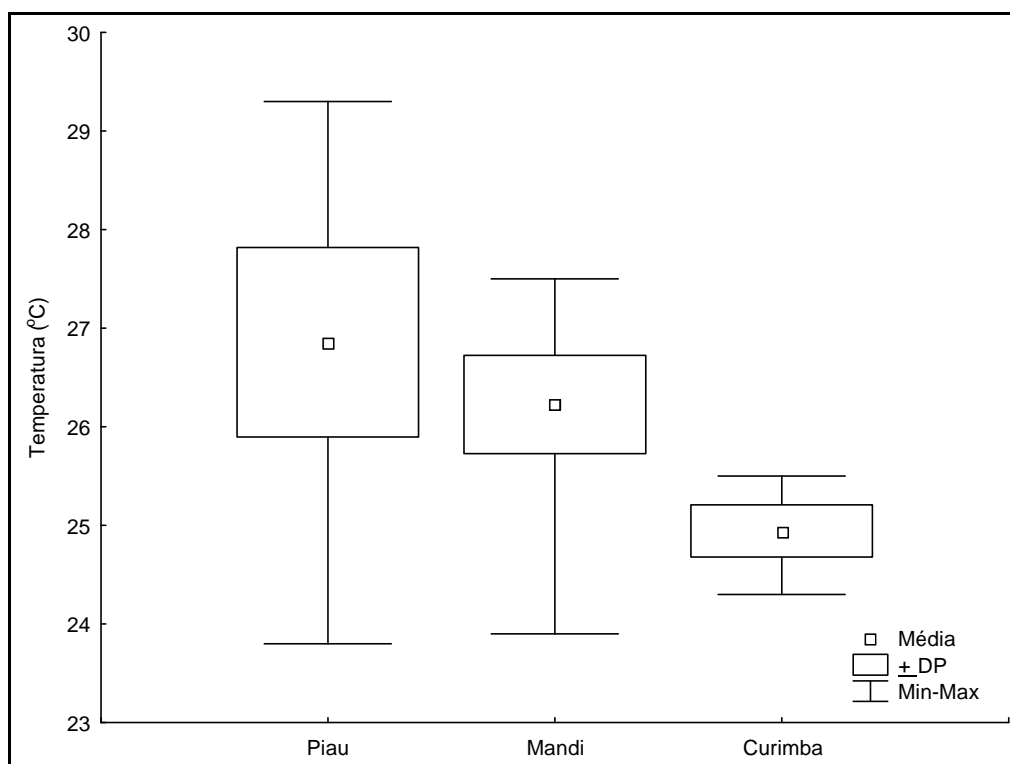


FIGURA 4.18- Temperatura medida nos ensaios de velocidade prolongada para o piau e o mandi.

O tamanho dos indivíduos testados variou em torno de 16 cm para o piau (FIG. 4.19), de 24 cm para o mandi (FIG. 4.20) e de 29 cm para a curimba (FIG. 4.21).

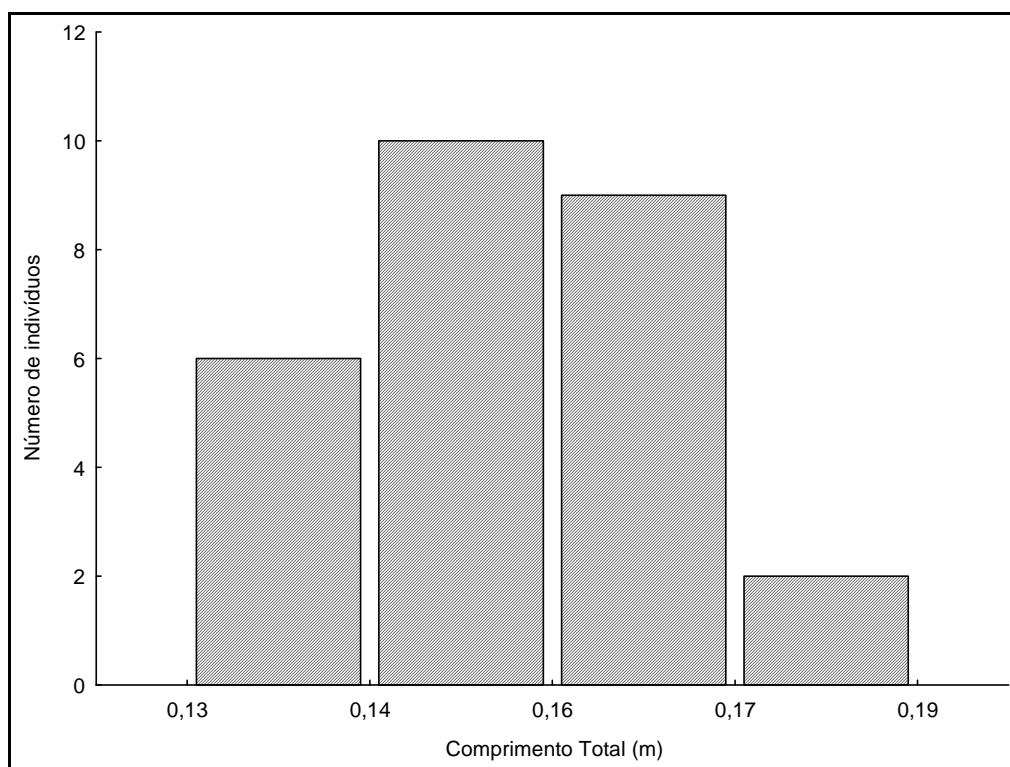


FIGURA 4.19- Classes de tamanho do piau.

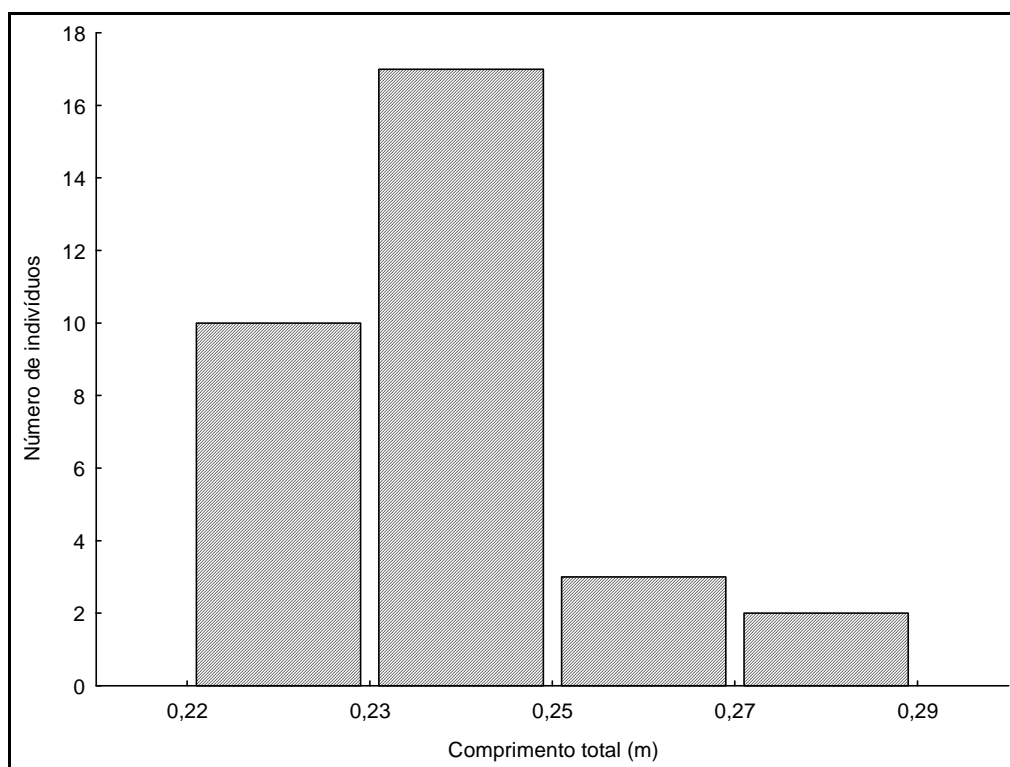


FIGURA 4.20- Classes de tamanho do mandi.

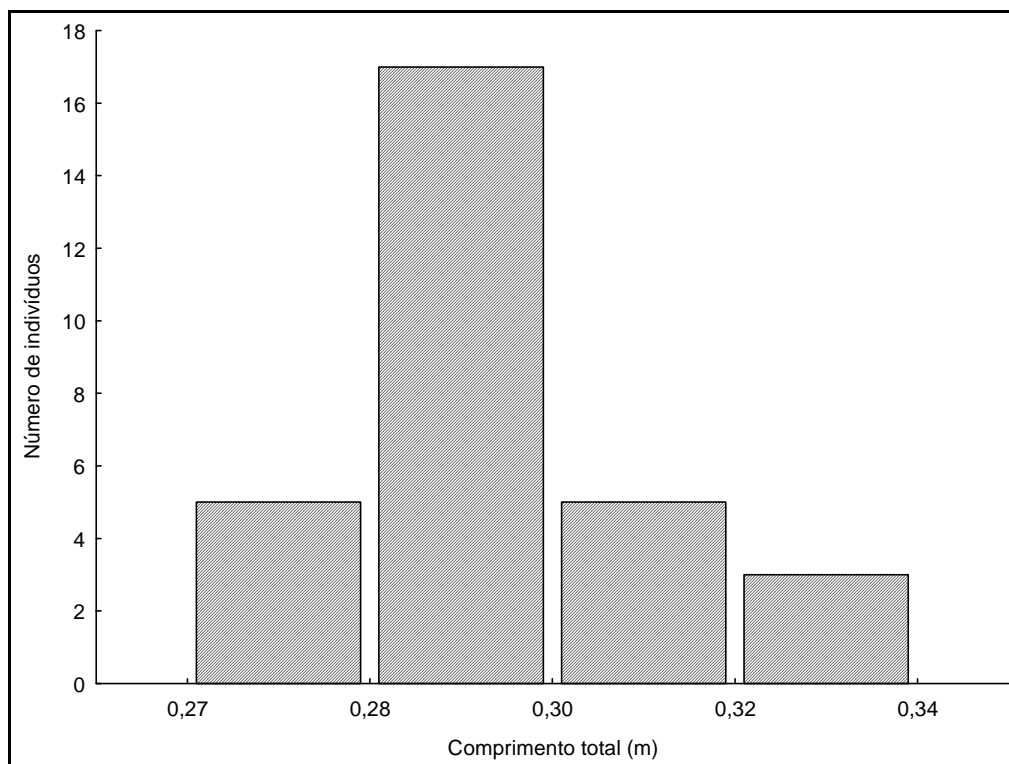


FIGURA 4.21- Classes de tamanho da curimba.

Para o piau, a mudança do modo prolongado para o sustentável foi estimada em 7 comprimentos por segundo (FIG. 4.22), em 5 comprimentos por segundo para o mandi (FIG. 4.23) e em 4 comprimentos por segundo para curimba (FIG. 4.24). Relações significativas foram obtidas entre a velocidade prolongada e tempo de fadiga, sendo que para uma mesma velocidade em comprimentos por segundos, o piau apresentou tempo de fadiga bastante superior ao mandi e à curimba (FIG. 4.25).

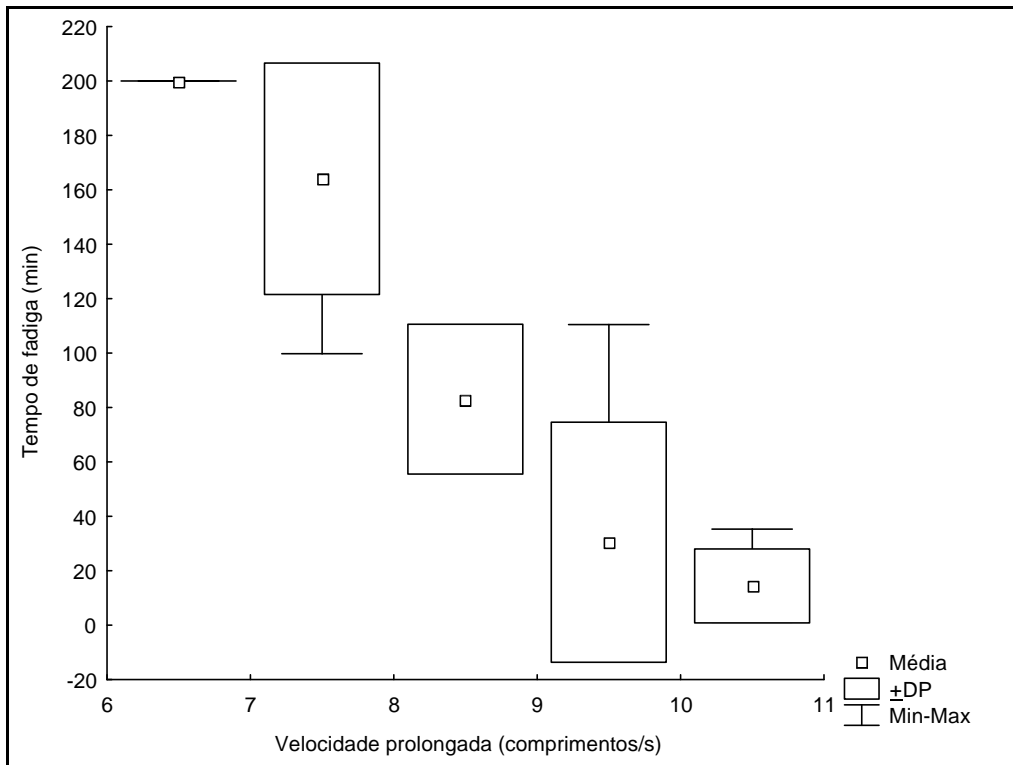


FIGURA 4.22-Tempo de fadiga x velocidade prolongada para o piau.

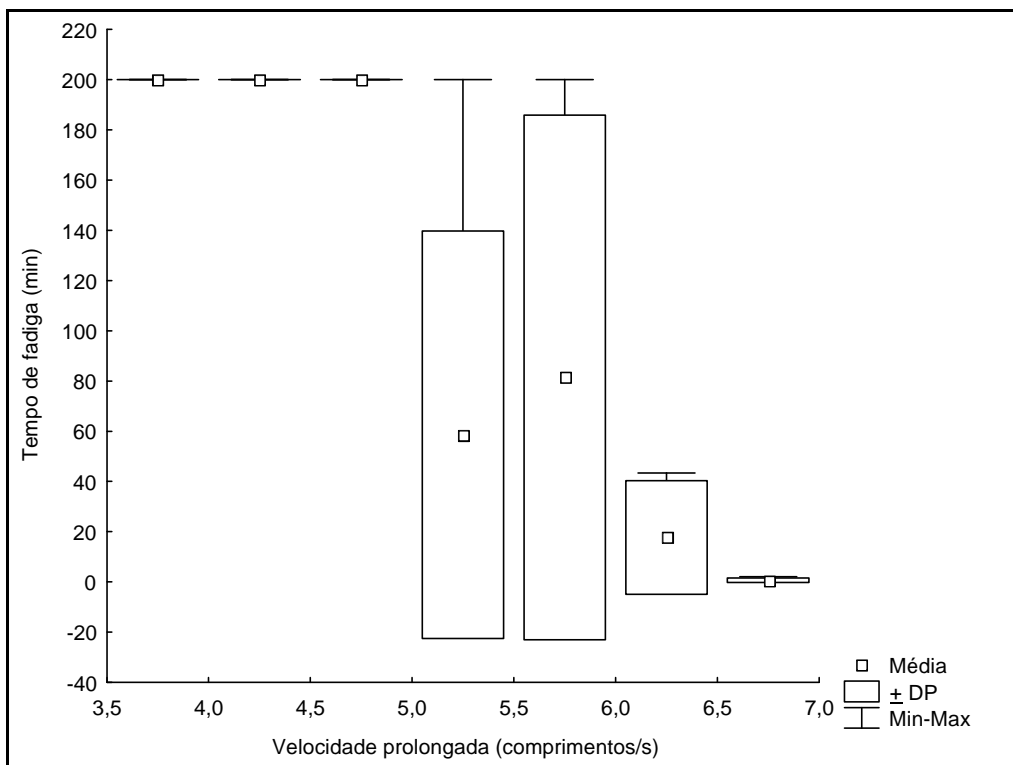


FIGURA 4.23-Tempo de fadiga x velocidade prolongada para o mandi.



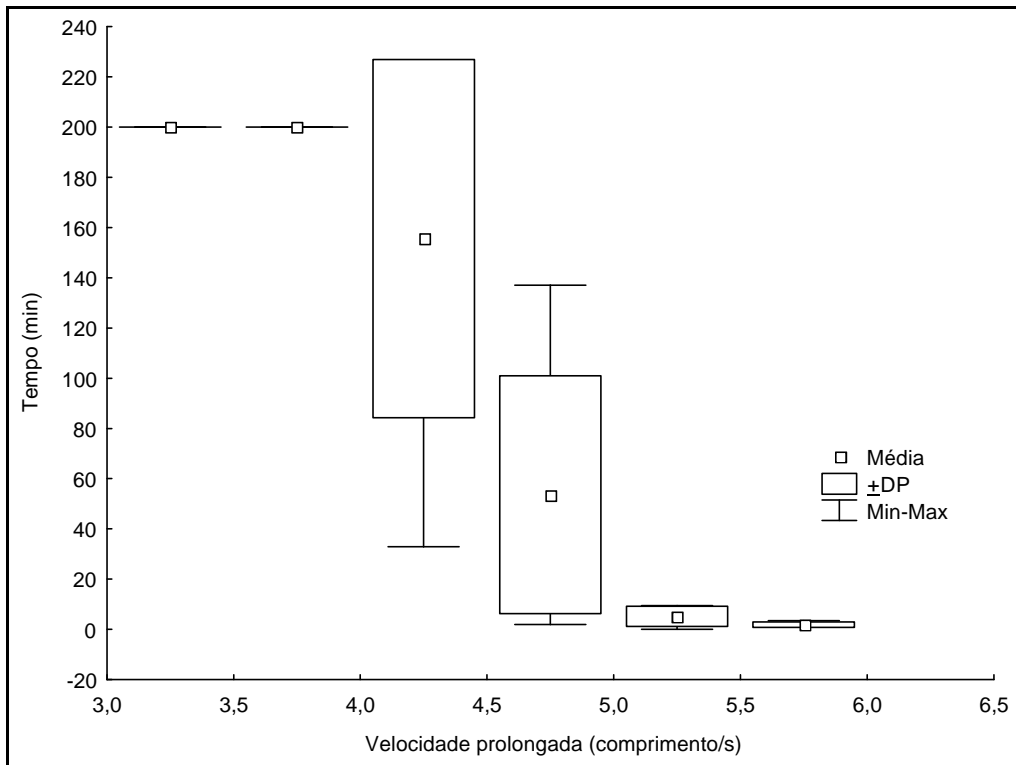


FIGURA 4.24-Tempo de fadiga x velocidade prolongada para a curimba.

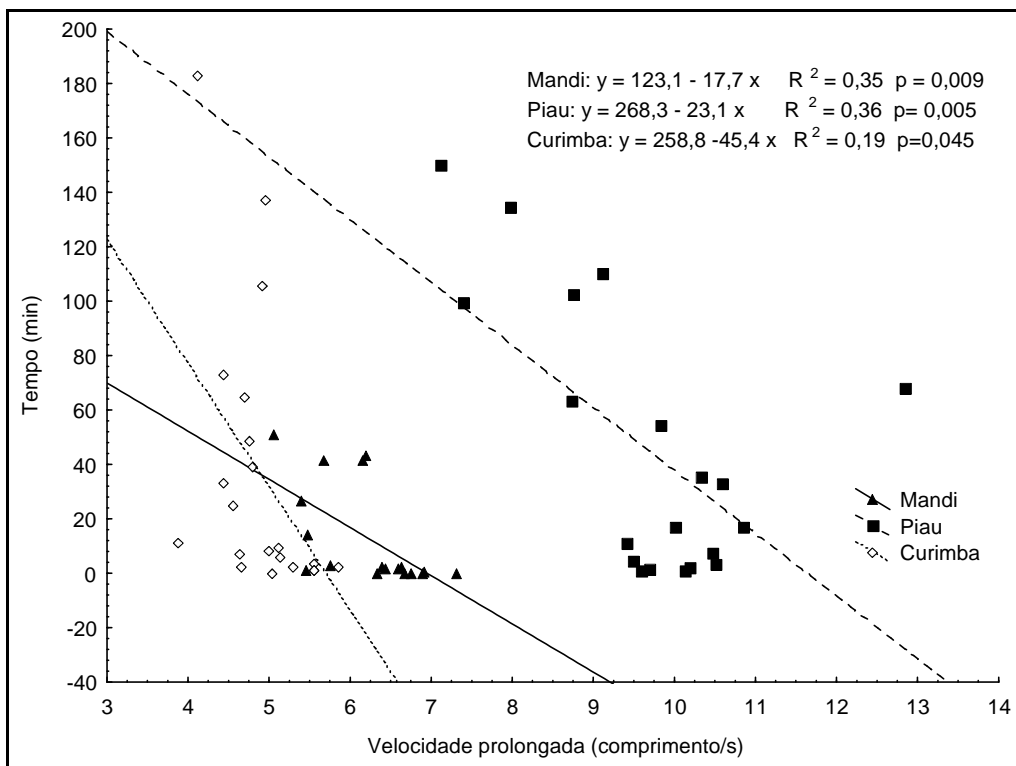


FIGURA 4.25-Tempo de fadiga x velocidade prolongada para as três espécies.

Para as três espécies estudadas também foi possível estimar o percentual de indivíduos fatigados ao longo do tempo para uma dada classe de velocidades (FIG. 4.26, 4.27 e 4.28) e qual a velocidade prolongada estas espécies são capazes de desenvolver em um dado intervalo de tempo (FIG. 4.29). Cada classe de tempo corresponde à 10 minutos de tempo de fadiga. Portanto, a classe 1 corresponde ao intervalo de 0 minutos à 10 minutos, e assim sucessivamente.

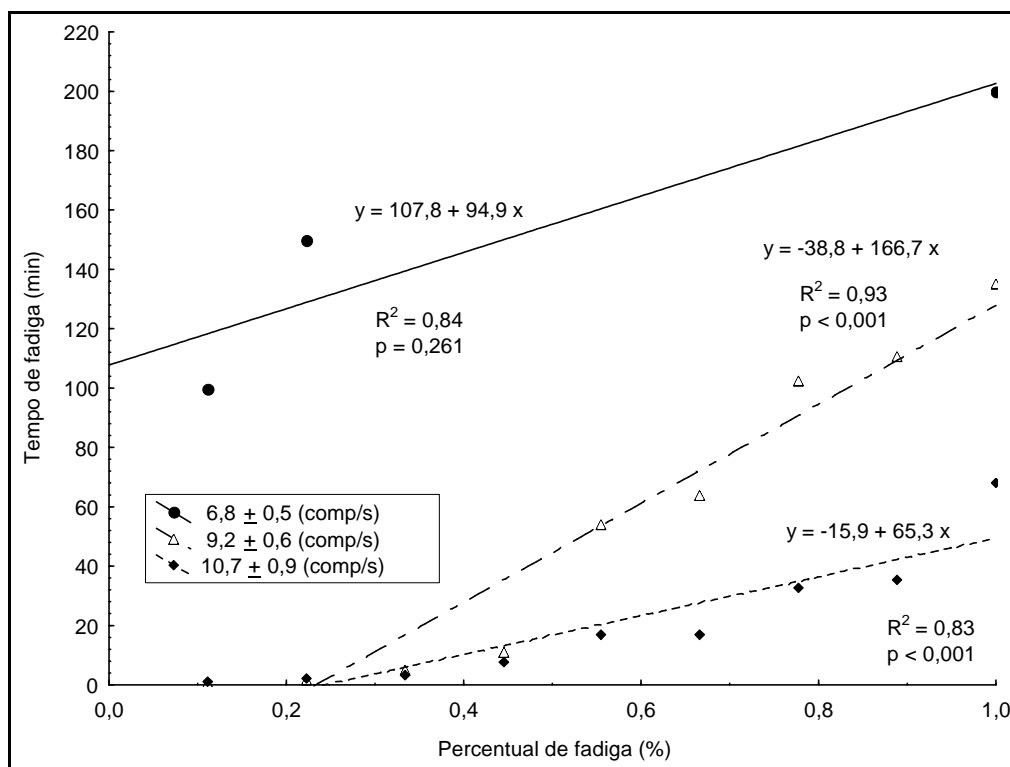


FIGURA 4.26- Percentual de pias fadigados x tempo de fadiga por classes de velocidade.

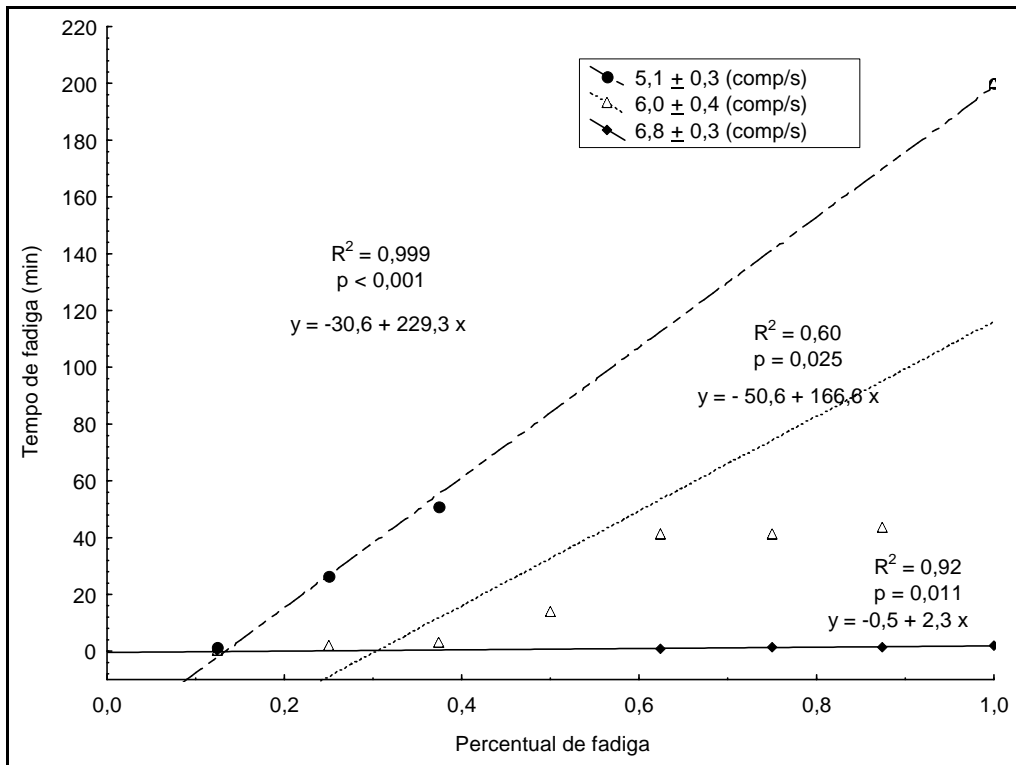


FIGURA 4.27- Percentual de mandis fadigados x tempo de fadiga por classes de velocidade.

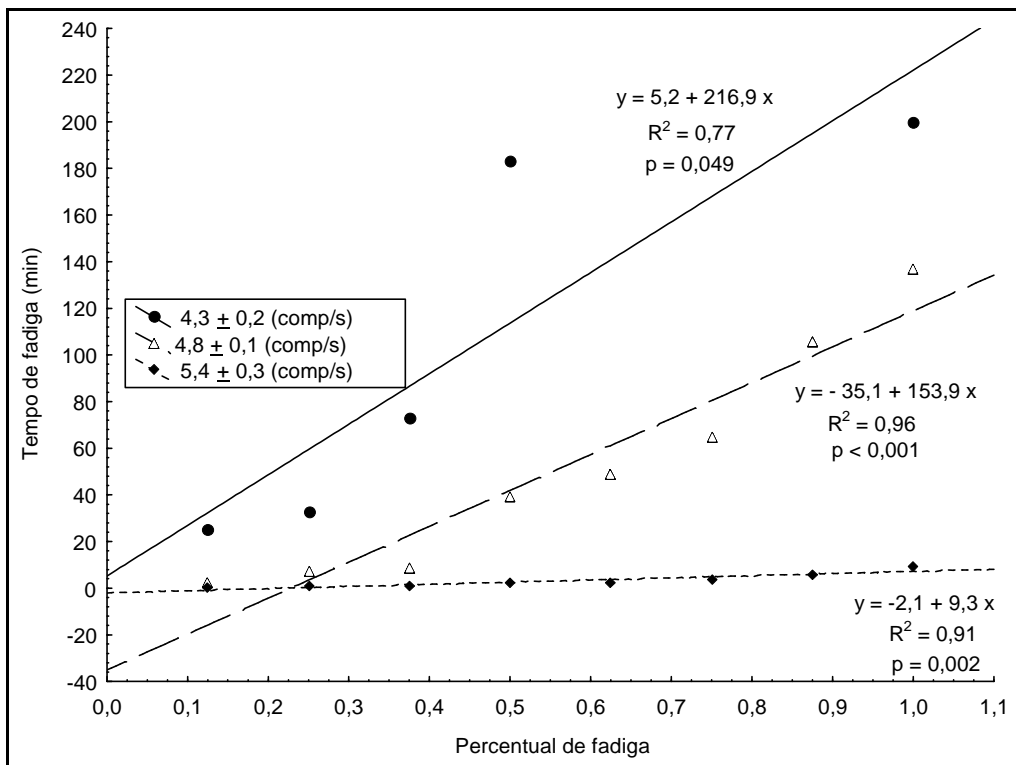


FIGURA 4.28- Percentual de curimbas fadigadas x tempo de fadiga por classes de velocidade.

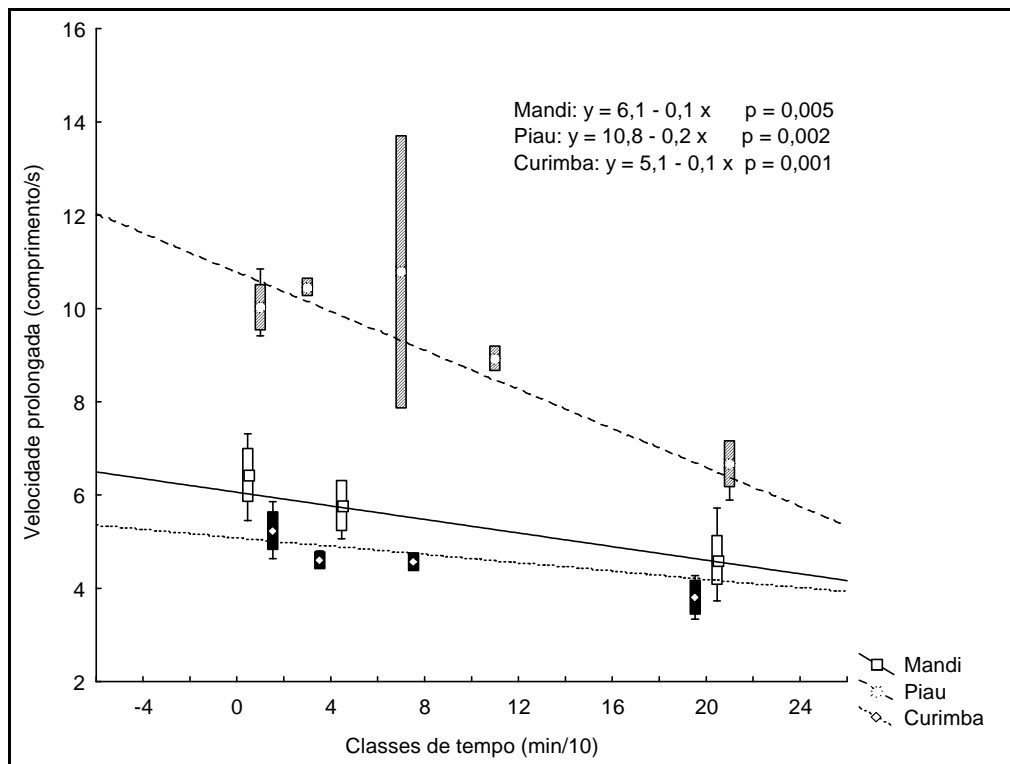


FIGURA 4.29-Velocidade prolongada x tempo de fadiga para as três espécies.

#### 4.1.3. Velocidade explosão

Os testes de explosão foram realizados somente com o piau e a curimba. Verificou-se na primeira espécie uma grande variação nos valores de velocidade de explosão para cada indivíduo testado (FIG. 4.30)

O principal fator responsável por esta variação é a duração da explosão, tanto para as velocidades testadas em m/s quanto comp/s (FIG. 4.31 e 4.32).

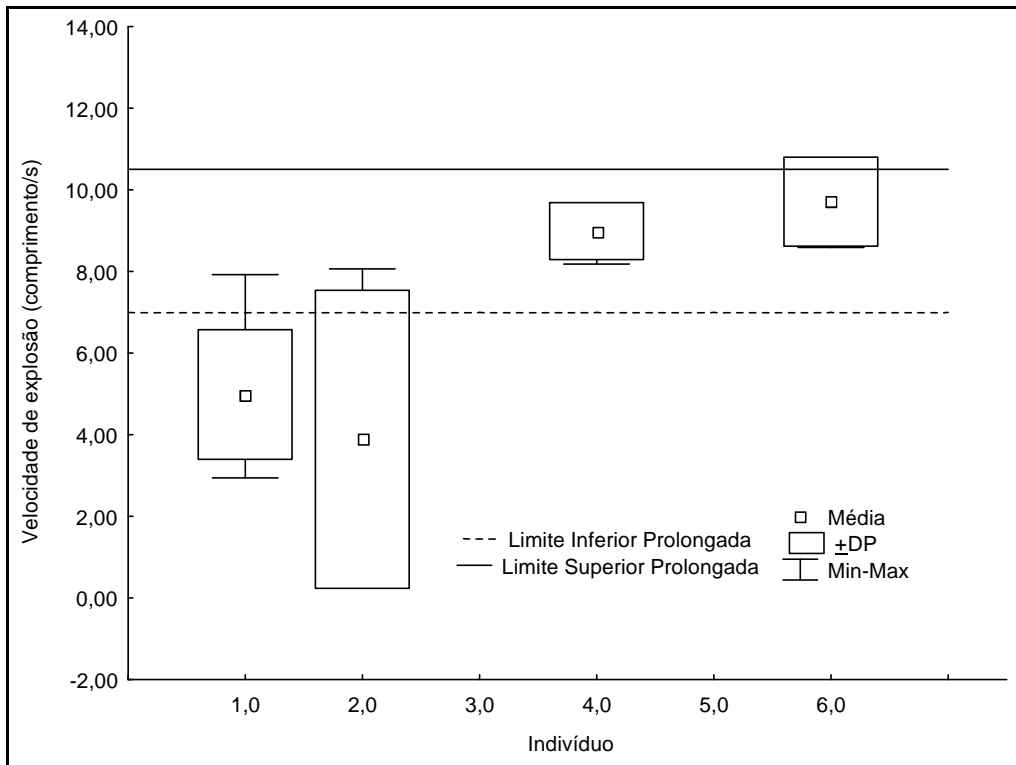


FIGURA 4.30- Velocidades de explosão (comp/s) separada por indivíduo para o piau.

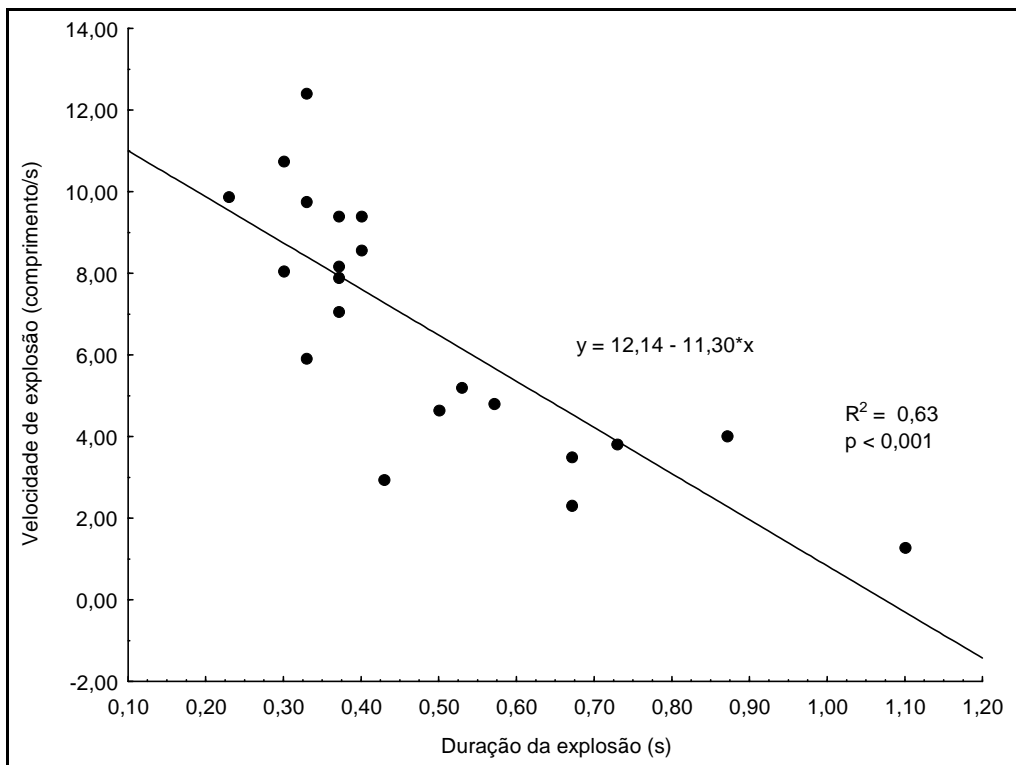


FIGURA 4.31- Velocidade de explosão (m/s) x duração da explosão para o piau.

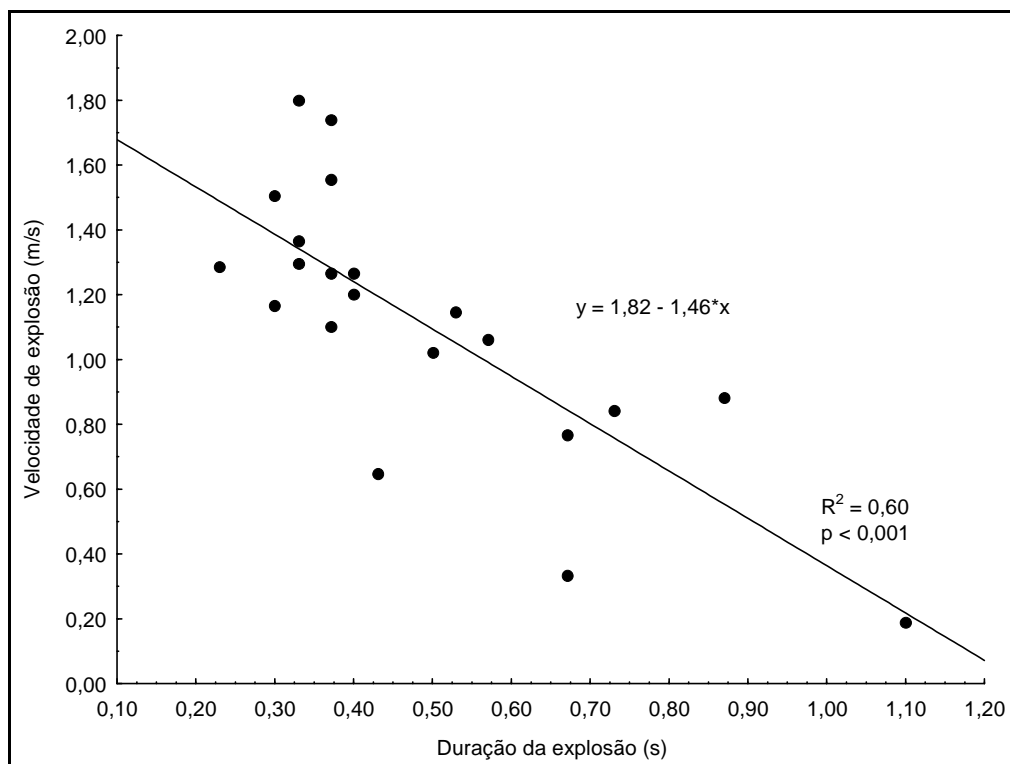


FIGURA 4.32- Velocidade de explosão (m/s) x duração da explosão para o piau.

Quando testada a relação entre estas velocidades em função do comprimento total do peixe e do tempo de explosão, verificou-se relações significativas entre estas variáveis, principalmente para velocidades em comp/s (TAB. 4.10 e 4.11). No entanto, peixes maiores apresentaram maiores velocidades absolutas (m/s), porem menores velocidades em termos de comp/s. Somente indivíduos com mais de 12 cm de comprimento, e por menos de 0,5 s, são capazes, por exemplo, de nadar mais de 8 comp/s. As regressões forneceram as EQ. 4.1 e EQ. 4.2 onde a velocidade de explosão é função do comprimento total (cm) e do tempo de duração (s).

$$Vel(m/s) = 1,60 - 0,01Comp.Total - 1,54Tempo \quad \text{EQ. 4.1}$$

$$Vel(comp/s) = 16,35 - 0,28Comp.Total - 9,88Tempo \quad \text{EQ. 4.2}$$

TABELA 4.10

Regressão múltipla da velocidade de explosão (m/s), comprimento total e duração da explosão para o piau

	Intercepto	Comprimento total	Duração da Explosão
<b>Beta</b>		0,1485	-0,8146
<b>Erro do Beta</b>		0,1509	0,1509
<b>B</b>	1,6001	0,0147	-1,5368
<b>Erro do B</b>	0,2704	0,0149	0,2848
<b>t(4)</b>	5,9181	0,9841	-5,3965
<b>p-valor</b>	0,0000	0,3381	0,0000
<b>R</b>		0,78740	
<b>R<sup>2</sup></b>		0,6200	
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,5778	
<b>N</b>		18	
<b>p-valor</b>		< 0,001	

TABELA 4.11

Regressão múltipla da velocidade de explosão (comp/s), comprimento total e duração da explosão para o piau

	Intercepto	Comprimento total	Duração da Explosão
<b>Beta</b>		-0,3681	-0,6922
<b>Erro do Beta</b>		0,1218	0,1218
<b>B</b>	16,3491	-0,2756	-9,8808
<b>Erro do B</b>	1,6500	0,0912	1,7379
<b>t(4)</b>	9,9084	-3,0229	-5,6854
<b>p-valor</b>	0,0000	0,0073	0,0000
<b>R</b>		0,8676	
<b>R<sup>2</sup></b>		0,7527	
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,7253	
<b>N</b>		18	
<b>p-valor</b>		< 0,001	

Nos testes de explosão com a curimba, também foi observada uma grande variação nos valores de velocidade de explosão para cada indivíduo testado (FIG. 4.33).

O principal fator responsável por esta variação é o tempo de natação, tanto para as velocidades testadas em m/s quanto comp/s (FIG. 4.34 e FIG. 4.35).

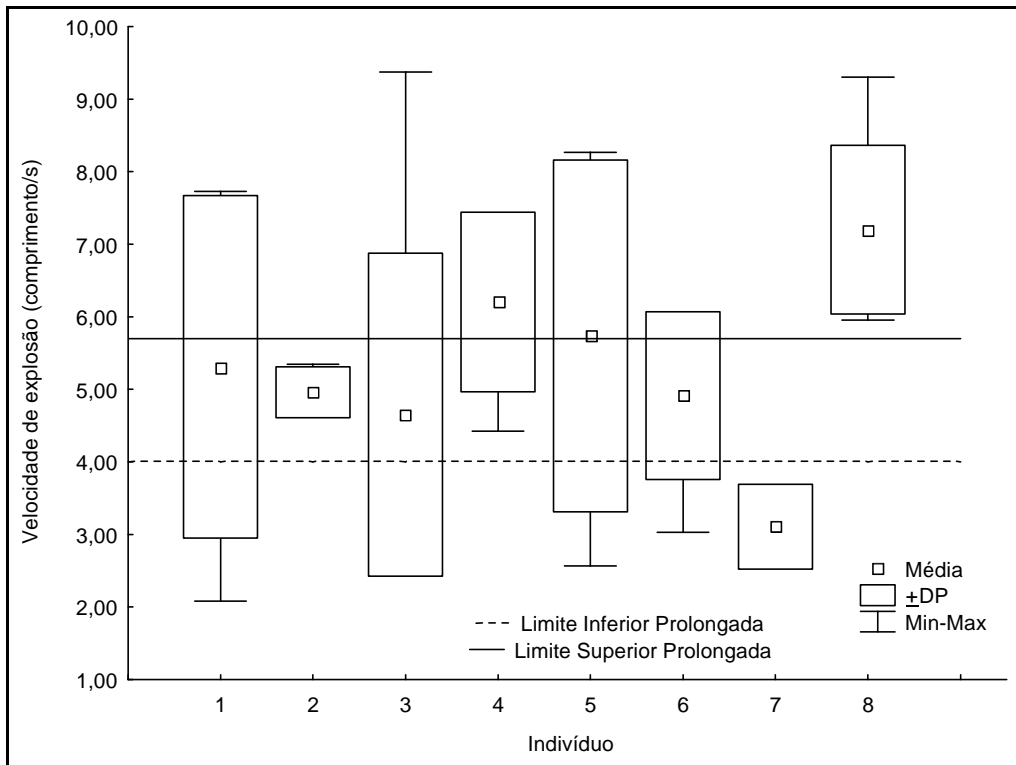


FIGURA 4.33- Velocidades de explosão (comp/s) separada por indivíduo para curimba.

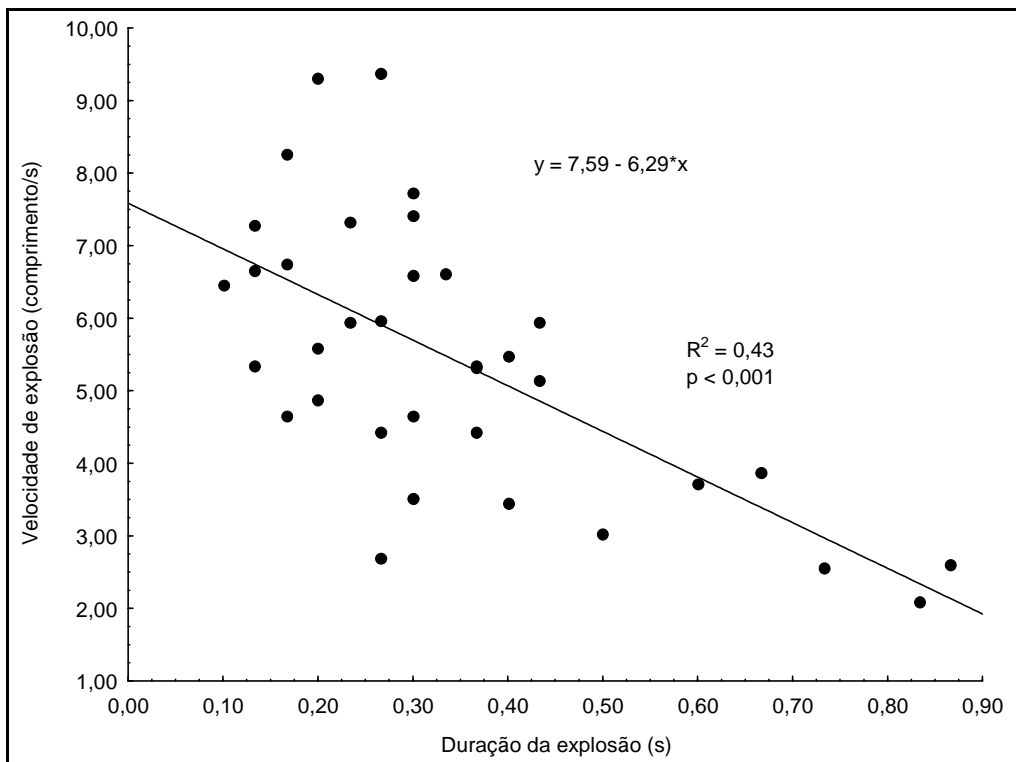


FIGURA 4.34- Velocidade de explosão (m/s) x duração da explosão para a curimba



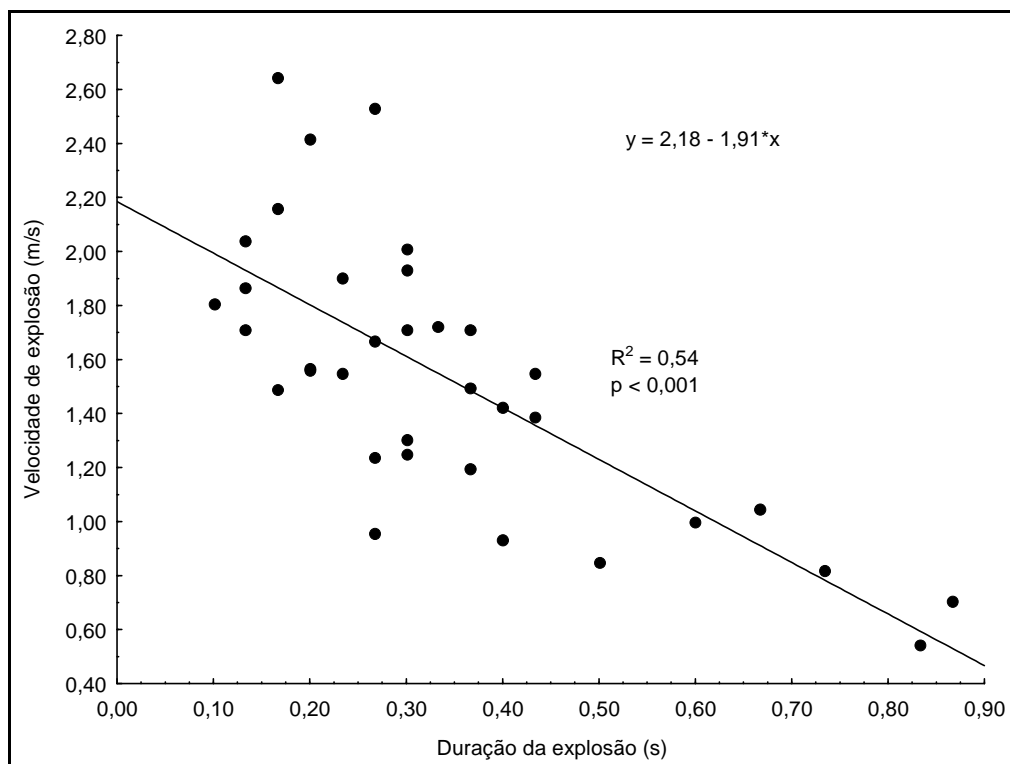


FIGURA 4.35- Velocidade de explosão (m/s) x duração da explosão para a curimba.

Quando testada a relação entre estas velocidades em função do comprimento total do peixe e do tempo de explosão (TAB. 4.12 e 4.13), verificaram-se relações significativas entre estas variáveis, principalmente para velocidades em comp/s. Desta maneira, quanto maior o tamanho do peixe e menor o tempo de explosão, maior a velocidade desenvolvida, em m/s ou comp/s. As regressões forneceram as EQ. 4.3 e EQ. 4.4 onde a velocidade de explosão é função do comprimento total (cm) e do tempo de duração (s).

TABELA 4.12

Regressão múltipla da velocidade de explosão (m/s), comprimento total e duração da explosão para a curimba.

	Intercepto	Comprimento total	Duração da Explosão
<b>Beta</b>		-0,2172	-0,7816
<b>Erro do Beta</b>		0,1176	0,1176
<b>B</b>	3,3549	-0,0396	-2,0383
<b>Erro do B</b>	0,6439	0,0214	0,3066
<b>t(4)</b>	5,2105	-1,8477	-6,6491
<b>p-valor</b>	0,0000	0,0739	0,0000
<b>R</b>		0,7620	
<b>R<sup>2</sup></b>		0,5808	
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,5546	
<b>N</b>		32	
<b>p-valor</b>		< 0,001	

TABELA 4.13

Regressão múltipla da velocidade de explosão (comp/s), comprimento total e duração da explosão para a curimba

	Intercepto	Comprimento total	Duração da Explosão
<b>Beta</b>		-0,4563	-0,7558
<b>Erro do Beta</b>		0,1116	0,1116
<b>B</b>	16,6824	-0,3076	-7,2947
<b>Erro do B</b>	2,2617	0,0752	1,0768
<b>t(4)</b>	7,3761	-4,0897	-6,7743
<b>p-valor</b>	0,0000	0,0003	0,0000
<b>R</b>		0,7889	
<b>R<sup>2</sup></b>		0,6223	
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,5987	
<b>N</b>		32	
<b>p-valor</b>		< 0,001	

$$Vel(m / s) = 3,35 - 0,04Comp.Total - 2,04Tempo \quad EQ. 4.3$$

$$Vel(comp / s) = 16,68 - 0,31Comp.Total - 7,29Tempo \quad EQ. 4.4$$

#### 4.1.4. Dados biométricos

Os testes de velocidade crítica, prolongada e de explosão além de fornecerem as respectivas velocidades produziram um amplo banco de dados contendo os dados biométricos das três espécies testadas.

Assim, foram feitas regressões lineares de forma a obter a variação da largura do peixe, importante característica da espécie utilizada no dimensionamento de mecanismos de transposição, com os comprimentos medidos (total e padrão). As FIG 4.36 e 4.37 mostram as relações obtidas para curimba, as FIG. 4.38 e 4.39 para o piauí e as FIG. 4.40 e 4.41 para o mandi.

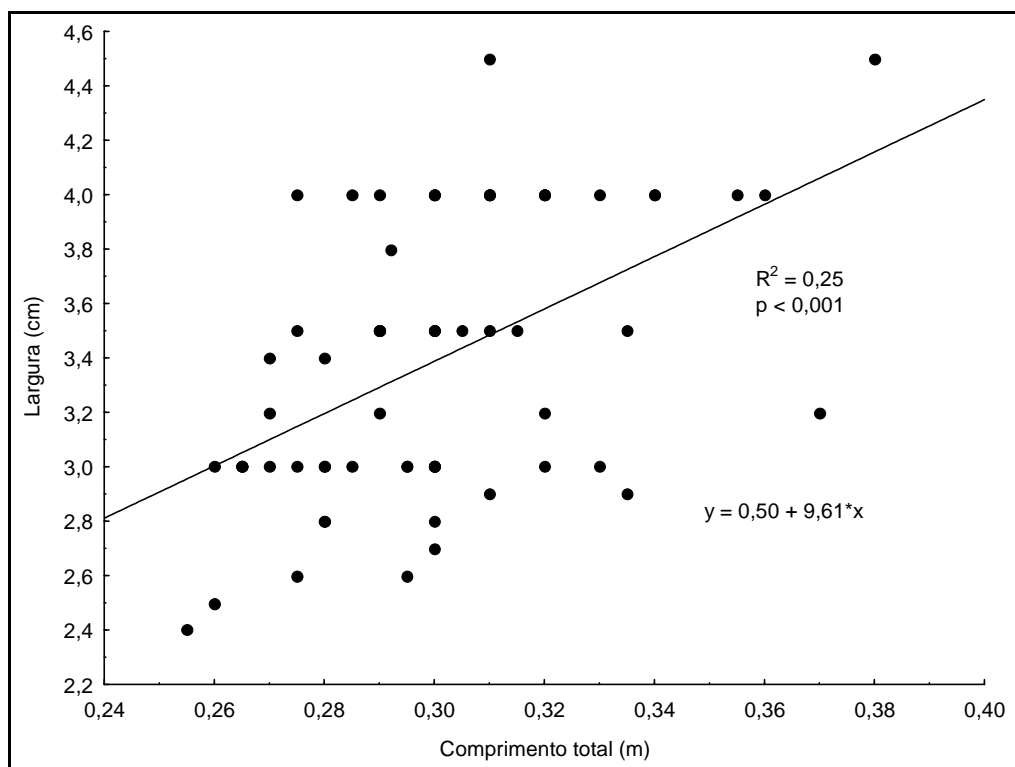


FIGURA 4.36-Largura x comprimento total da curimba.

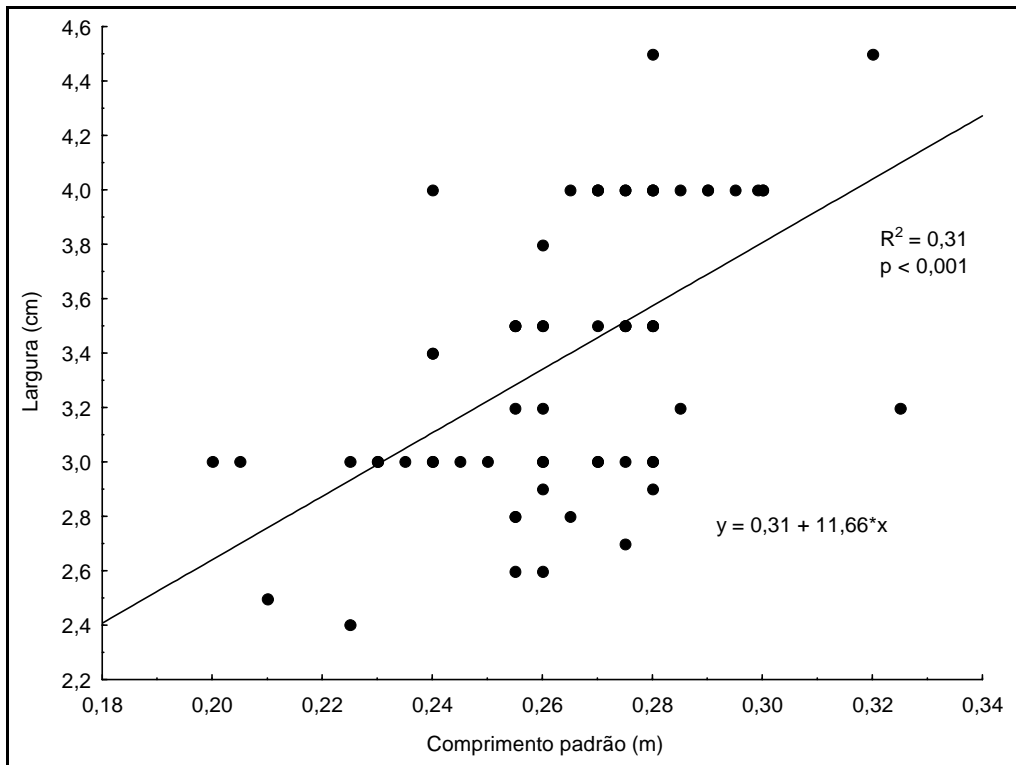


FIGURA 4.37-Largura x comprimento padrão da curimba.

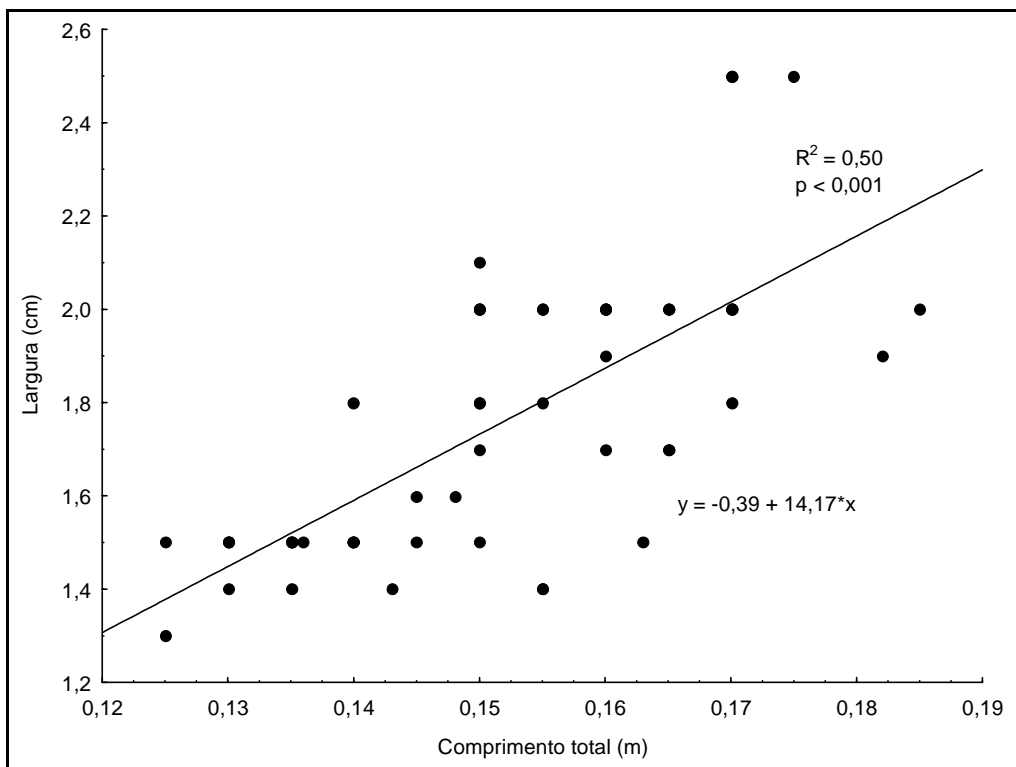


FIGURA 4.38-Largura x comprimento total do piaui.

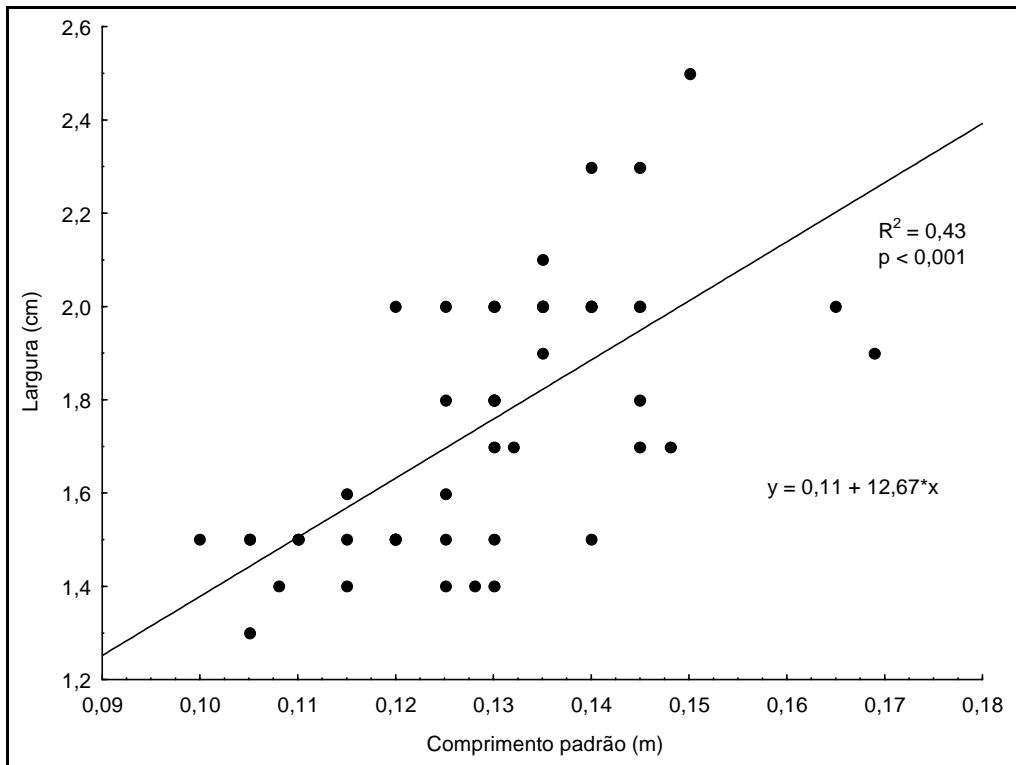


FIGURA 4.39-Largura x comprimento padrão do piau.

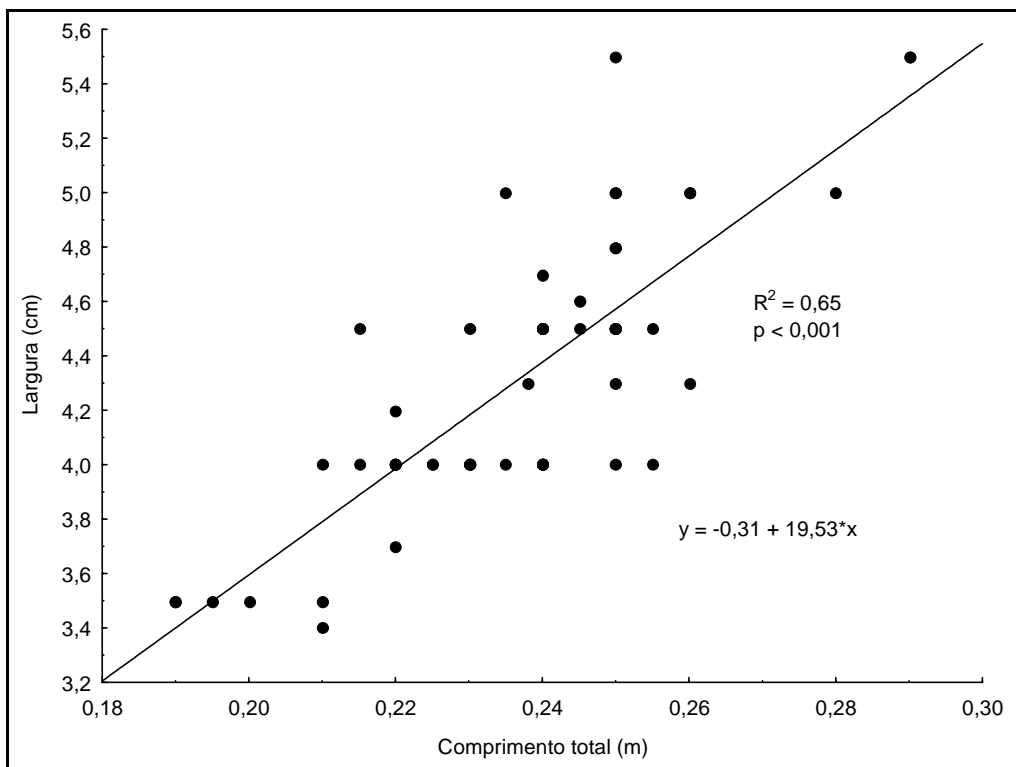


FIGURA 4.40-Largura x comprimento total do mandi.

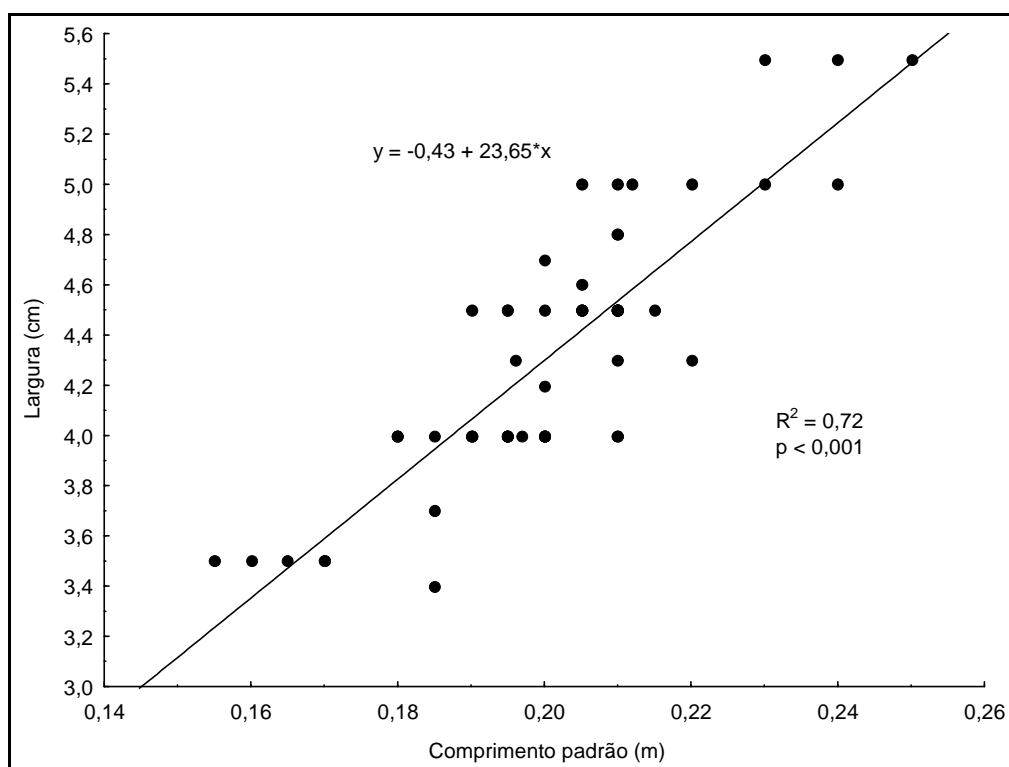


FIGURA 4.41-Largura x comprimento padrão do mandi.

As características biométricas dos peixes podem condicionar o projeto de MTP. Assim, através da análise dos dados biométricos dos indivíduos testados, foi possível obter a largura máxima atingida por cada espécie (TAB. 4.14). Para a curimba e para o mandi uma escada do tipo slot vertical deve ter a abertura da ranhura de pelo menos 15 cm enquanto para o piau esta abertura deve ser de pelo menos 10 cm.

TABELA 4.14

Comprimentos padrão e larguras máximas de três espécies de peixes.

Espécies	Comprimento Padrão Máximo para espécie * (cm)	Largura máxima correspondente ao comp. padrão (cm)	$b_o$ adotado em relação a largura máxima (cm)
<i>Prochilodus costatus</i> (curimba)	42	5,20	15
<i>Pimelodus maculatus</i> (mandi)	36	8,08	15
<i>Leporinus reinhardtii</i> (piau)	17	2,26	10

FONTE: \* Reis, Kullander e Ferraris, 2003

#### 4.1.5. Incertezas de medição

A análise de incerteza da velocidade a partir das variáveis medidas (vazão, diâmetro da tubulação e tempo) mostrou que o erro da velocidade crítica nunca ultrapassou 2% do valor absoluto (FIG. 4.42). Já o incerteza da velocidade prolongada apresentou valores inferiores a 1% ( FIG. 4.43).

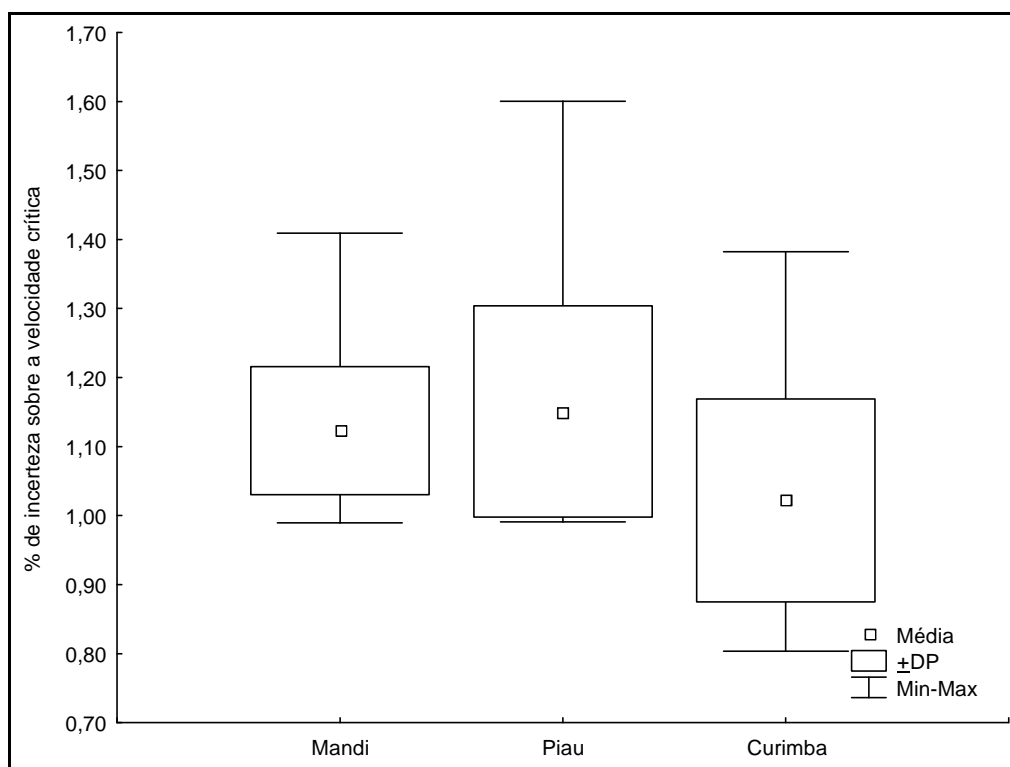


FIGURA 4.42- Incerteza da velocidade crítica.

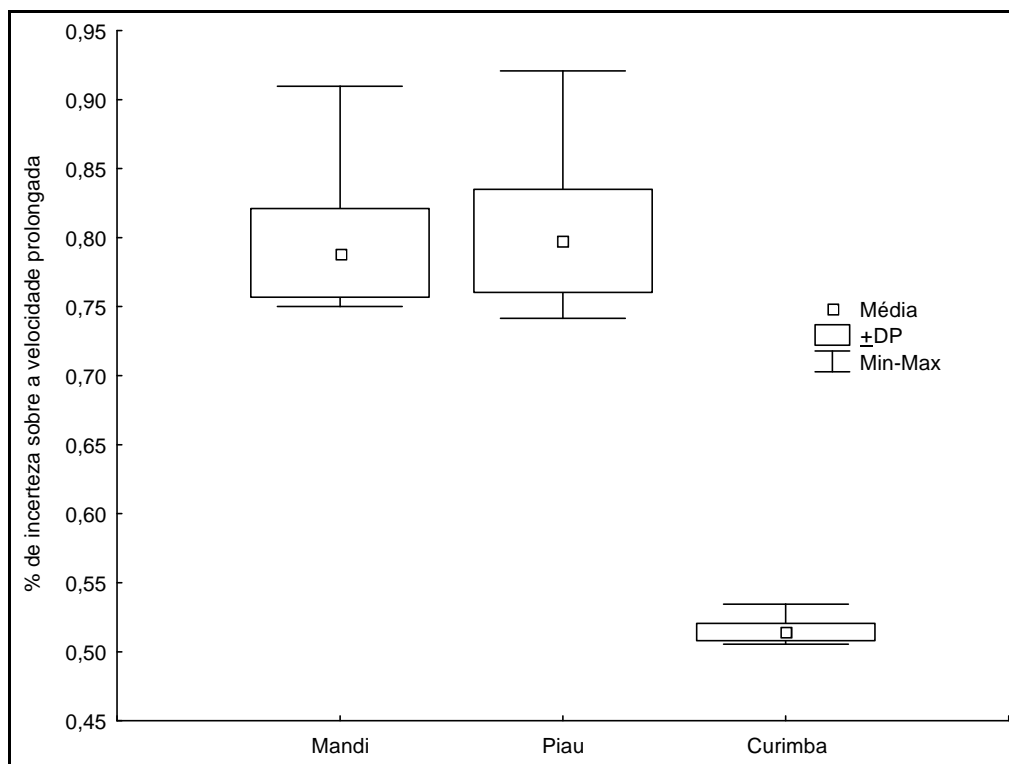


FIGURA 4.43- Incerteza da velocidade prolongada.

## **4.2 Aplicação das características dos peixes neotropicais no projeto de escadas do tipo slot vertical**

### **4.2.1. Características hidráulicas das escadas do tipo slot vertical obtidas a partir de critérios natatórios e que consideram a capacidade de peixes neotropicais**

#### **4.2.1.1. Método de Jones, Kiceniuk e Bamford (1974)**

Segundo este critério um peixe utilizando se de uma escada como a de Igarapava, de 300 metros de comprimento, deveria desenvolver uma velocidade total de 1m/s (300 metros/5 minutos).

A partir das curvas de velocidade crítica chegou-se que, neste modo de natação, um piau com o tamanho de primeira maturação (16 cm) nada 1,32 m/s enquanto o mandi (23 cm) nada 1,47 m/s e a curimba (29 cm) 1,23 m/s.

Portanto a velocidade máxima do escoamento para o piau deve ser 0,32 m/s, para o mandi 0,47 m/s e para a curimba 0,23 m/s.



#### 4.2.1.2. Método de Katopodis (1992)

Com os dados de velocidade prolongada foram obtidos os gráficos mostrados nas FIG. 4.44 a 4.46 para os valores de velocidade e tempo de fadiga adimensionalizados.

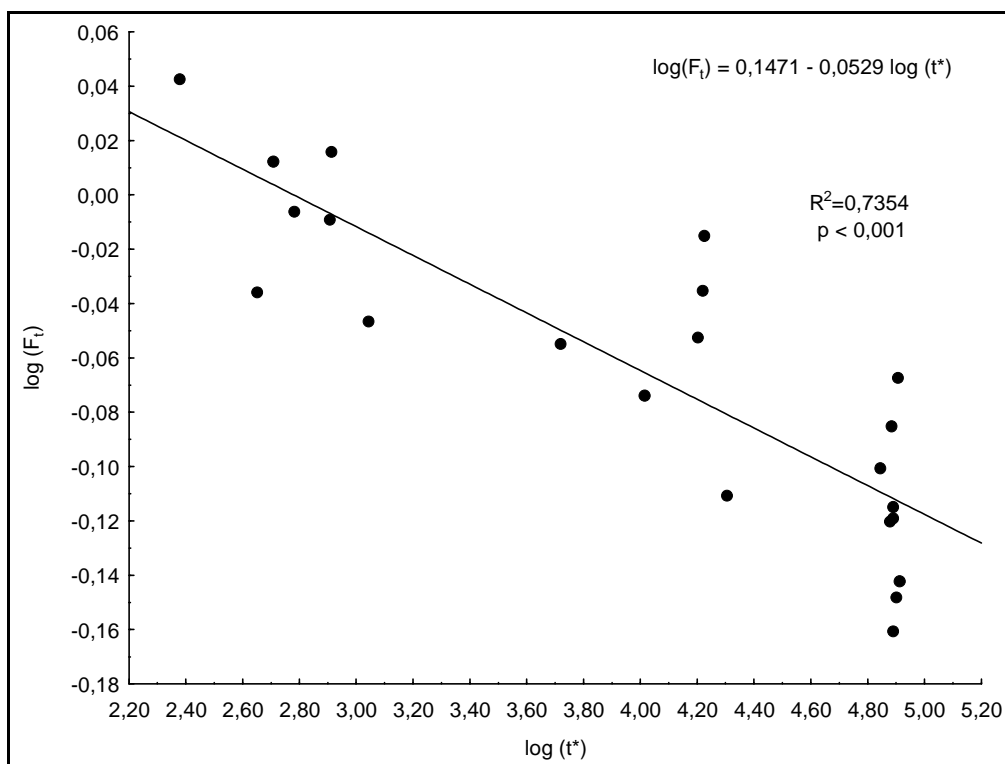


FIGURA 4.44 – Ajuste para os valores adimensionalizados de velocidade ( $F_t$ ) e tempo de fadiga ( $t^*$ ) para o mandi

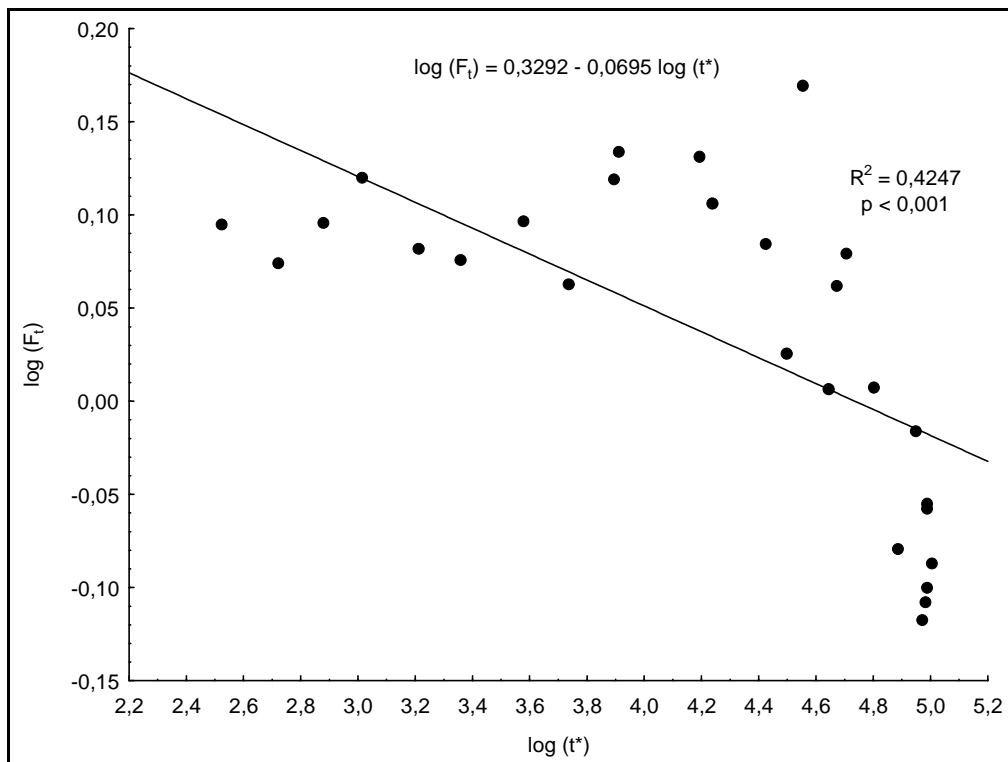


FIGURA 4.45 – Ajuste para os valores adimensionalizados de velocidade (F<sub>t</sub>) e tempo de fadiga (t\*) para o piau

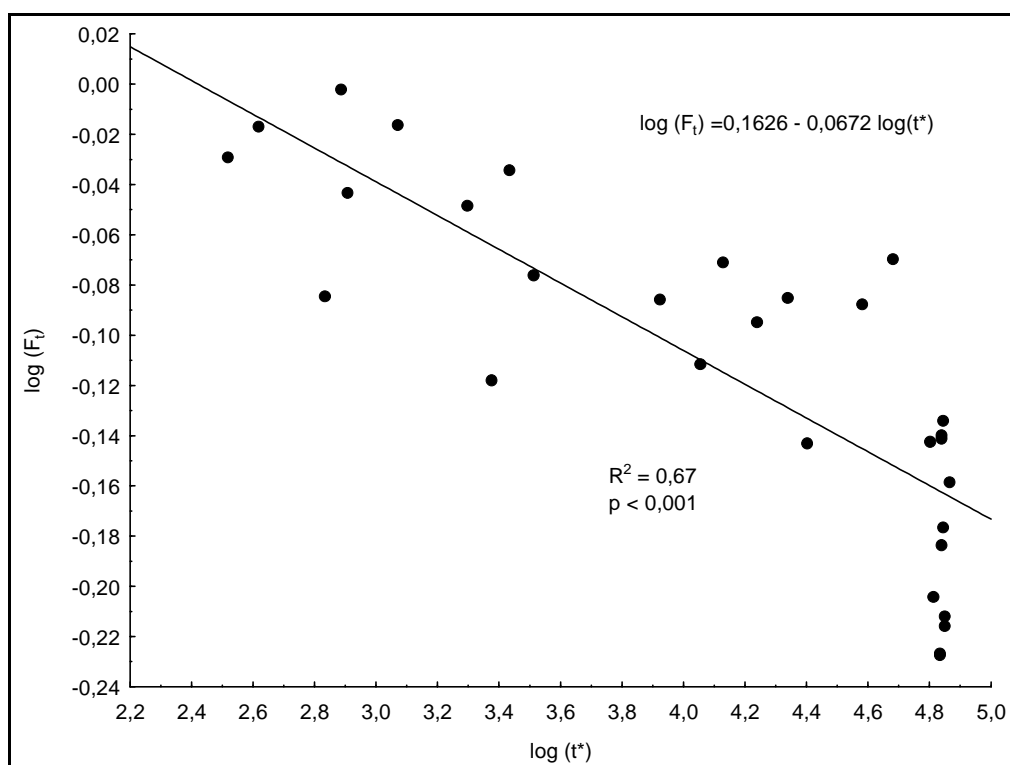


FIGURA 4.46 – Ajuste para os valores adimensionalizados de velocidade (F<sub>t</sub>) e tempo de fadiga (t\*) para a curimba

A partir das curvas ajustadas nos gráficos acima, se obteve as EQ. 4.5 para o mandi, EQ. 4.6 para o piau e a EQ. 4.7 para a curimba

$$F_t = 1,40t^{-0,0529} \quad \text{EQ. 4.5}$$

$$F_t = 2,13t^{-0,0695} \quad \text{EQ. 4.6}$$

$$F_t = 1,45t^{-0,0672} \quad \text{EQ. 4.7}$$

Portanto, chegou-se a EQ. 4.8 (mandi), a EQ. 4.9 (piau) e a EQ. 4.10 (curimba) para velocidade da água ( $\varepsilon$ ) e distância nadada ( $F$ ):

$$\varepsilon = 12,08F^{-17,90} \quad \text{EQ. 4.8}$$

$$\varepsilon = 1444,50F^{-13,39} \quad \text{EQ. 4.9}$$

$$\varepsilon = 6,47F^{-13,88} \quad \text{EQ. 4.10}$$

Para uma escada com o comprimento de 300 metros foi obtido então uma velocidade máxima da água de 1,16 m/s para o mandi, de 1,22 m/s para o piau e de 1,17 m/s para a curimba.

#### 4.2.2. Variações dos parâmetros hidráulicos e construtivos com a utilização das características dos peixes neotropicais

Fixando a abertura do slot ( $b_o$ ) em 40 cm, foram feitas regressões entre a velocidade máxima e a inclinação e entre este último parâmetro e o volume da escada (FIG. 4.47 e FIG. 4.48).

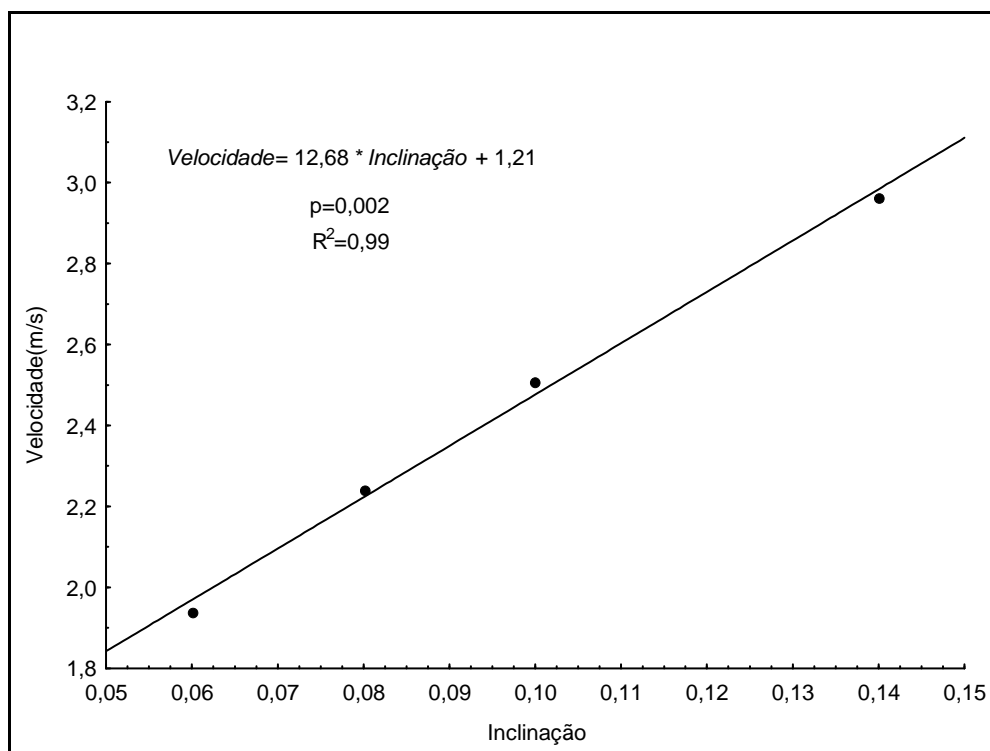


FIGURA 4.47- Velocidade máxima x inclinação para abertura do slot de 40 cm.

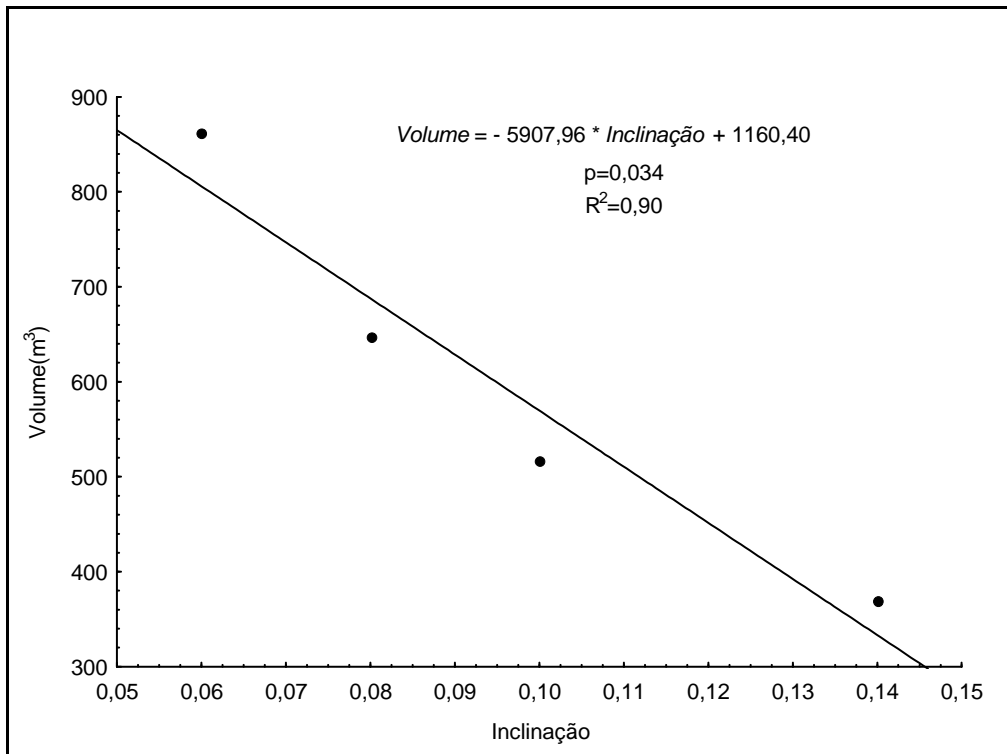


FIGURA 4.48- Volume da escada x inclinação para abertura do slot de 40 cm.

Já fixando a inclinação em 6% obteve-se a relação entre a velocidade máxima e a abertura do slot (FIG. 4.49). Da mesma forma, foi determinada a equação entre o volume da escada e a abertura do slot (FIG. 4.50).

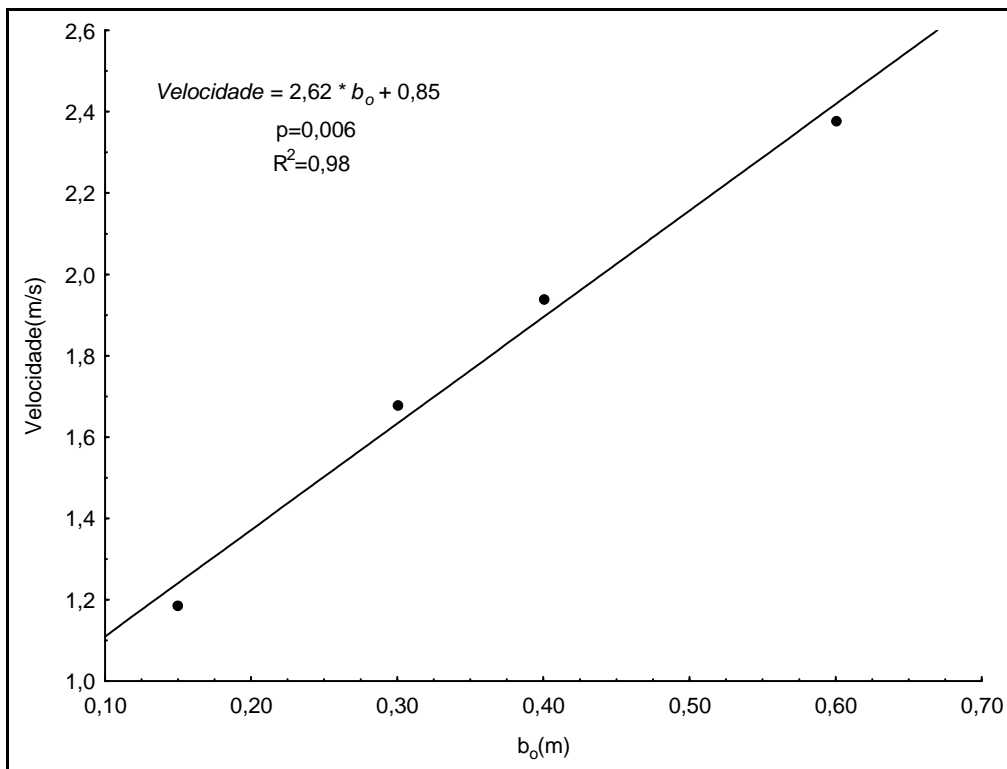


FIGURA 4.49- Velocidade máxima x abertura do slot para inclinação de 6%

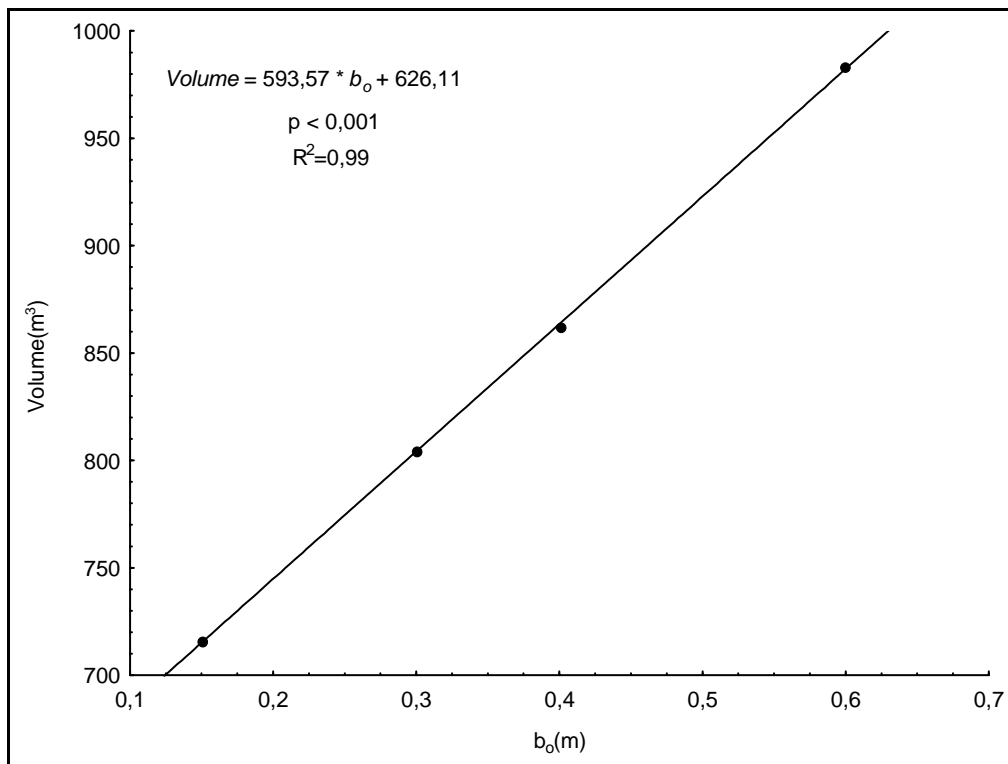


FIGURA 4.50-Volume de concreto do canal x abertura do slot para inclinação de 6%

Foram também realizados testes de regressão múltipla para se verificar como a abertura do slot e inclinação explicam a velocidade máxima (TAB 4.15) e o volume da escada (TAB. 4.16), obtendo-se as equações EQ. 4.11 e EQ. 4.12.

TABELA 4.15

Regressão múltipla da velocidade máxima, abertura do slot e inclinação

	Intercepto	Abertura do slot	Inclinação
<b>Beta</b>		0,6119	0,7150
<b>Erro do Beta</b>		0,0458	0,0458
<b>B</b>	0,0384	2,6405	13,6303
<b>Erro do B</b>	0,0992	0,1979	0,8740
<b>t(4)</b>	0,3871	13,3456	15,5944
<b>p-valor</b>	0,7184	0,0002	0,0001
<b>R</b>		0,9958	
<b>R<sup>2</sup></b>		0,9917	
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,9876	
<b>N</b>		7	
<b>p-valor</b>		< 0,001	

TABELA 4.16

Regressão múltipla do volume da escada, abertura do slot e inclinação

	Intercepto	Abertura do slot	Inclinação
<b>Beta</b>		0,364488	-0,950884
<b>Erro do Beta</b>		0,109236	0,109236
<b>B</b>	1007,15	565,33	-6515,30
<b>Erro do B</b>	84,9083	169,4281	748,4677
<b>t(4)</b>	11,86159	3,33670	-8,70484
<b>p-valor</b>	0,000289	0,028925	0,000959
<b>R</b>		0,9762	
<b>R<sup>2</sup></b>		0,9530	
<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>		0,9294	
<b>N</b>		7	
<b>p-valor</b>		< 0,002	

$$V_{\max} = 0,0384 + 2,64b_o + 13,63S_o \quad \text{EQ 4.11}$$

$$\text{Volume} = 1007,15 + 565,33b_o - 6515,30S_o \quad \text{EQ. 4.12}$$

### 4.2.3. Caminhos preferenciais para peixes neotropicais dentro de escadas do tipo slot vertical

Tendo como base as velocidades levantadas para as três espécies, obtidas do escoamento que constituem barreiras à determinado modo de natação. Assim, a FIG. 4.51 mostra um plano longitudinal (paralelo ao fundo da escada) a 5 cm do chão. A área mais escura corresponde a uma barreira de velocidade para mandi considerando o modo prolongado. Nesta área, um indivíduo de primeira maturação deve utilizar a velocidade do tipo explosão.

Assim, a FIG. 4.52 mostra o caminhamento desta barreira ao longo do tempo.

Para análise das barreiras de velocidade foi utilizada uma ferramenta que permite a obtenção da área de um determinado plano. Dessa forma, foram traçados planos cujas áreas possuíam velocidades inferiores a uma determinada capacidade natatória. Assim, por exemplo, para o mandi foram construídas áreas cujas velocidades eram inferiores à máxima prolongada de um indivíduo com o comprimento de primeira maturação, ou seja, 1,23 m/s. De agora para frente, esta área será chamada área viável de passagem.

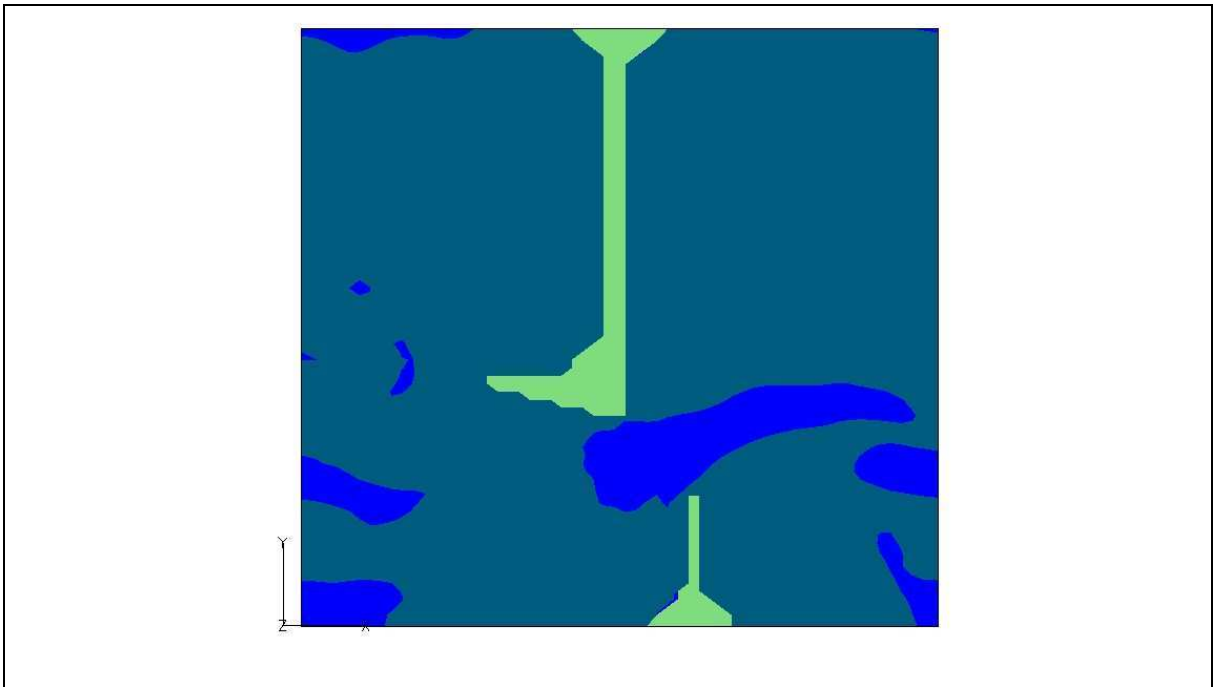


FIGURA 4.51-Perfil longitudinal a 5cm do fundo da escada considerando a velocidade prolongada máxima de um mandi no comprimento de primeira maturação.

A análise da área viável de passagem foi feita para um plano que corta os dois slot como mostrado na FIG. 4.52.

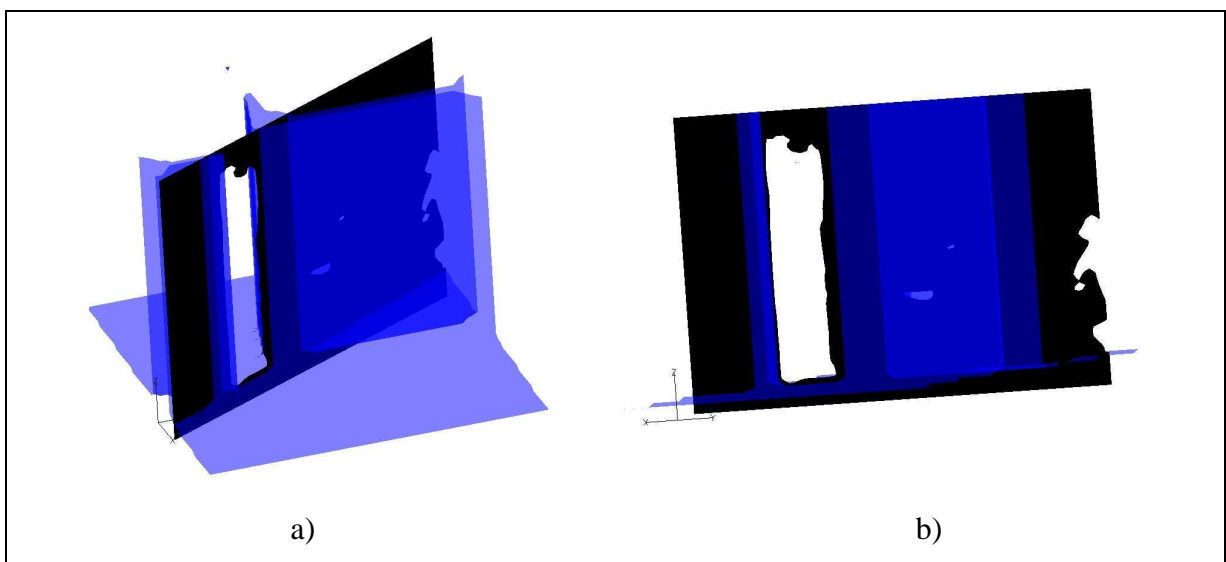


FIGURA 4.52- a) Vista em perspectiva do plano passando pela ranhura b) Vista em planta.

A FIG. 4.53 mostra a variação da área viável de passagem para cada espécie ao longo da ranhura considerando a máxima prolongada. Esta área é fornecida em porcentagens da área total da abertura, ou seja, no caso do mandi a área média de passagem considerando sua

máxima velocidade prolongada é 2% da área de fluido na ranhura. O mesmo tipo de análise foi feito para a velocidade crítica (FIG. 4.54) e de explosão (FIG. 4.55).

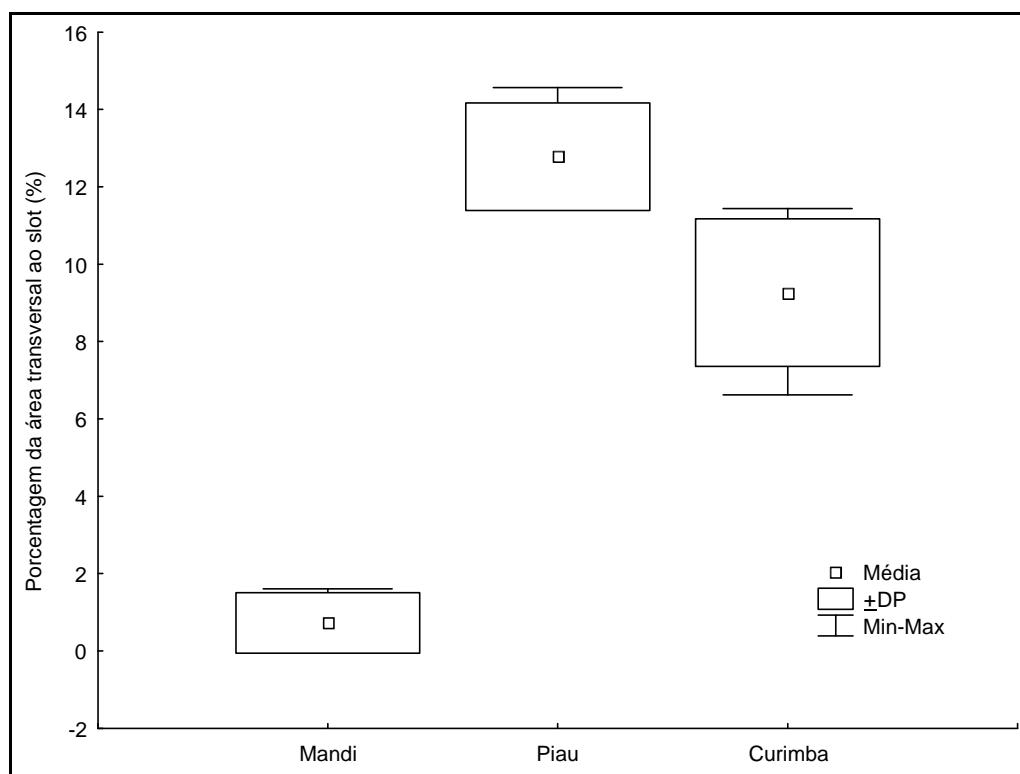


FIGURA 4.53- Áreas viáveis de passagens considerando a velocidade prolongada máxima.

Considerando a máxima velocidade prolongada, a FIG. 4.53 mostra que a barreira de velocidade encontrada pelo mandi é muito maior que a barreira encontrada pela curimba e pelo piau. O mesmo resultado não é obtido considerando a velocidade crítica, cuja FIG. 4.57 indica que o mandi (5,5%) teria mais área viável do que o piau(3%) e a curimba (1%).

Caso a curimba e o piau, ambos de primeira maturação utilizasse sua máxima capacidade natatória, ou seja, a explosão mantida por intervalos de tempo inferior a 1 segundo, a primeira espécie encontraria uma barreira menor do o piau. Enquanto este último na ranhura tem uma área de livre passagem em torno de 17%, a curimba tem uma área de 47% ( ambos para o comprimento de primeira maturação).



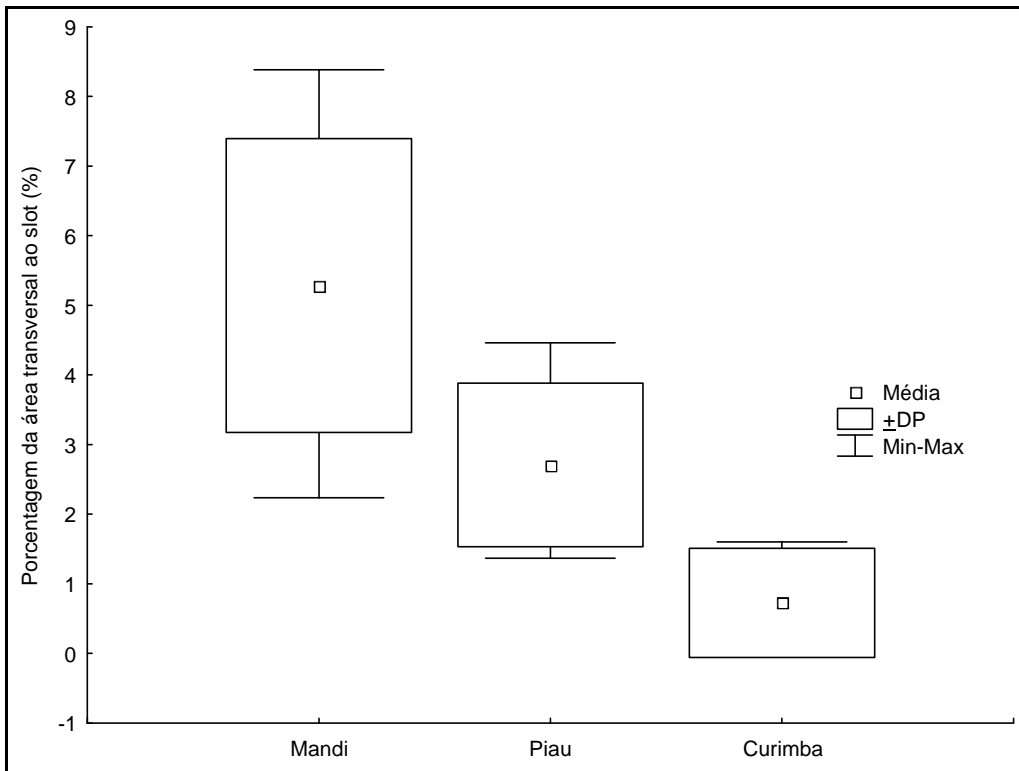


FIGURA 4.54- Áreas viáveis de passagens considerando a velocidade crítica.

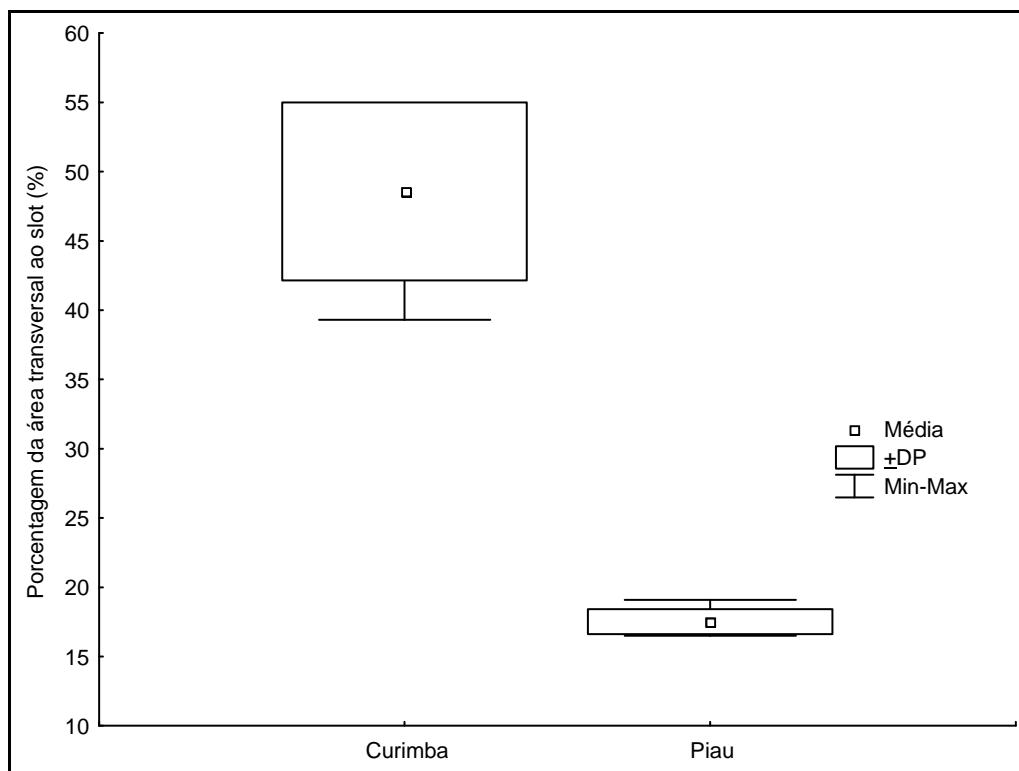


FIGURA 4.55- Áreas viáveis de passagens considerando a velocidade de explosão.

Da mesma forma que o plano localizado na ranhura, foram calculadas as áreas viáveis de passagem nos planos longitudinais, paralelos ao fundo do canal. Assim, como o mandi nada

mais próximo ao chão, verificou-se para espécie apenas os planos mais fundos (5,10, 20 e 100 cm do fundo da escada). Já para curimba e para o piau foram analisados os planos (60, 80,100 e 120 cm). A FIG. 4.56 mostra os dados obtidos considerando a velocidade prolongada máxima e a FIG. 4.57 a velocidade crítica.

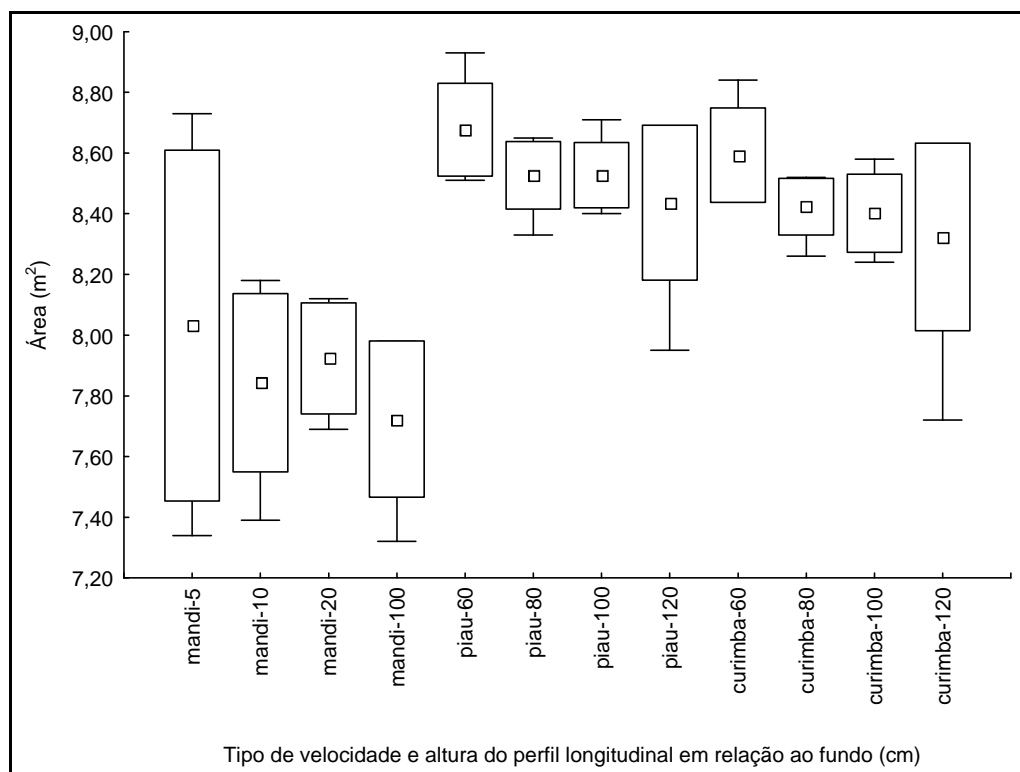


FIGURA 4.56 – Áreas viáveis no plano longitudinal considerando a velocidade máxima prolongada.

Analisando a FIG. 4.56, mesmo nadando em profundidades mais baixas, o mandi possui menos área viável do que o piau e a curimba, que nadam em áreas mais no meio da coluna. Quando verificada a velocidade crítica, os valores das áreas se aproximam entre todas as espécies.

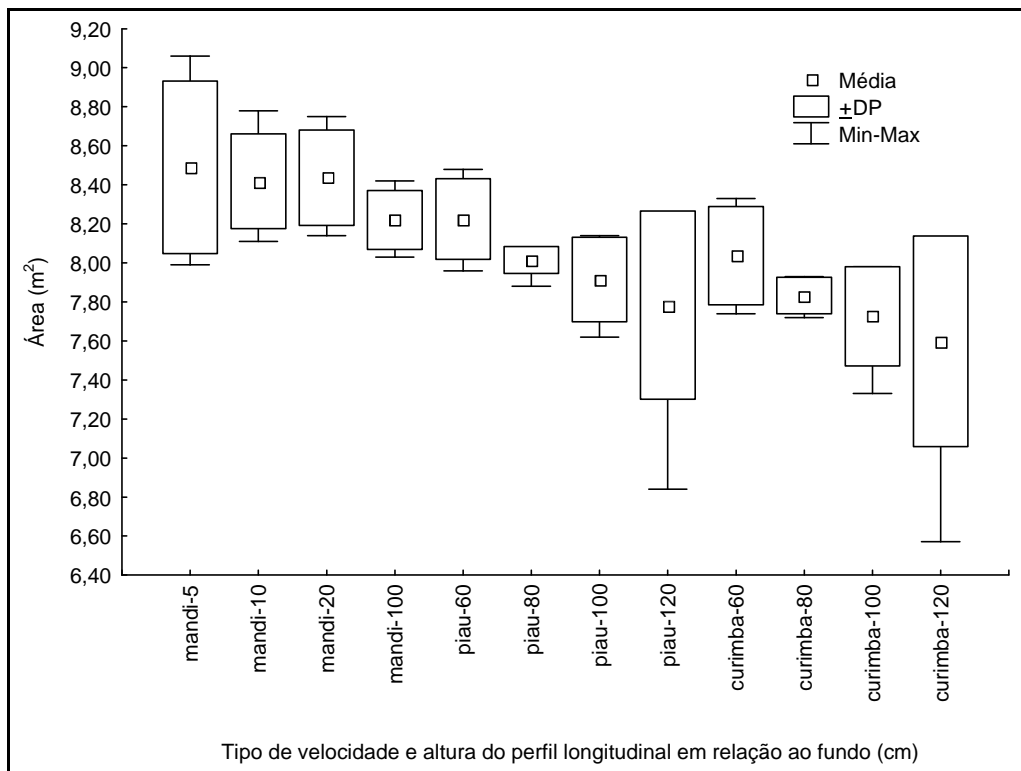


FIGURA 4.57 – Áreas viáveis no plano longitudinal considerando a velocidade crítica.

## 5 CONCLUSÃO

Segundo Peake (2004) estudar a capacidade natatória de várias espécies de peixe é fato de grande importância para o estabelecimento de critérios para dimensionamento de MTP. Assim, o primeiro objetivo do presente trabalho foi fornecer curvas de velocidade natatória para as algumas das principais espécies migradoras existentes no Brasil.

O primeiro tipo de velocidade medida, a crítica, é mundialmente e empregada no dimensionamento de MTP. Apesar das limitações do seu método de obtenção, comentadas anteriormente, a velocidade crítica já foi levantada para várias espécies de clima temperado, tendo grande valor por permitir comparações entre a capacidade natatória dos peixes destes diferentes sistemas.

Tomou-se o cuidado de fornecer ao peixe testado as condições necessárias para o que mesmo pudesse desenvolver toda sua capacidade natatória. Assim, foram avaliados os parâmetros de qualidade da água como pH, que sempre esteve entre 6 e 9 (Conama, 1996), o oxigênio dissolvido, que foi maior que 6 mg/L (Conama, 1996) e a temperatura, que sempre esteve entre 18 e 29°C, faixa de valores encontrados na calha do rio São Francisco (Sato e Godinho, 2003).

O comprimento total, o comprimento padrão e o peso foram as variáveis que explicaram significativamente os valores de velocidade crítica (individualmente). A forte relação entre a velocidade crítica desenvolvida e o comprimento total reflete a importância da nadadeira caudal, um dos mais importantes elementos de propulsão dos peixes que apresentam padrão de locomoção do tipo subcarangiforme (Webb, 1994). Quando comparadas com outros estudos de velocidade crítica, as curvas obtidas para as três espécies testadas se mostraram satisfatórias do ponto de vista da qualidade do ajuste, apesar do número relativamente reduzido de indivíduos testados.

Verificou-se também que, para velocidade crítica, as espécies neotropicais apresentaram velocidade superior à de muitas espécies de clima temperado.

A aquisição da velocidade crítica é condicionada por diversos fatores, se destacando entre eles o tipo de procedimento experimental e a temperatura. Segundo Hammer (1995), esta dependência em relação determinados fatores, torna comparações de velocidades crítica

susceptível a erros. Variações no incremento de velocidade ( $\Delta U$ ) e de tempo ( $t_i$ ) são modificações na metodologia capazes de influenciar significativamente os valores obtidos. Entretanto, as diferenças entre os processos experimentais (TAB.5.1) se mostraram incapazes de explicar a grande diferença observada entre os valores de velocidade crítica encontrados para as espécies testadas e os apresentados por espécies de clima temperado. Segundo Farlinger e Beamish (1977), se adotássemos  $t_i$  de 60 min e  $\Delta U$  de 10 cm/s, a velocidade encontrada seria apenas 6% inferior enquanto se  $t_i$  fosse 10 min e  $\Delta U$  10 cm/s a velocidade crítica deveria ser superior a encontrada com  $t_i$  5 min e  $\Delta U$  de 5 m/s (valores utilizados nos testes para as três espécies). Portanto, os procedimentos experimentais não explicam a diferença observada entre as três espécies neotropicais e as espécies de clima temperado uma vez que, em média, as primeiras apresentam uma velocidade crítica 50% superior àquelas de clima temperado, para um mesmo comprimento.

TABELA 5.1

Aspectos experimentais e estatísticos de curvas de velocidade crítica conhecidas

Espécie	n	Equação	$\Delta U$ (cm/s)	$t_i$ (min)	Autor
Pike	192	$V = 4,9L^{0,55}$	10	10	Jones et al. (1974)
Walleye	54	$V = 13,07L^{0,51}$	10	10	Jones et al. (1974)
Grayling	94	$V = 36,23L^{0,19}$	10	10	Jones et al. (1974)
Flathead chub	28	$V = 6,42L^{0,67}$	10	10	Jones et al. (1974)
Inconnu	22	$V = 30,3L^{0,75}$	10	10	Jones et al. (1974)
Longnose sucker	169	$V = 11,03L^{0,53}$	10	10	Jones et al. (1974)
White sucker	20	$V = 10,03L^{0,55}$	10	10	Jones et al. (1974)
Burbot	56	$V = 30,6L^{0,07}$	10	10	Jones et al. (1974)
Humpback whitefish	159	$V = 18,2L^{0,35}$	10	10	Jones et al. (1974)
Broad whitefish	33	$V = 9,7L^{0,45}$	10	10	Jones et al. (1974)
Atlantic salmon	55	$V = 0,173 + 1,57L$	5	5	McCleave e Stred (1975)
Sockeye salmon	6	$V = 2,5L^{0,6345}$	10	60	Brett e Glass (1973)
Curimba	20	$V = 1,78L^{0,3}$	5	5	Presente estudo
Mandi	24	$V = 4,13L^{0,7}$	5	5	Presente estudo
Piau três-pintas	25	$V = 3,12L^{0,5}$	5	5	Presente estudo

Já a temperatura é, provavelmente, um importante condicionante, já que explica 30% do valor da velocidade crítica medida para o piau. Este parâmetro vem sendo considerado o principal fator ambiental relacionado à capacidade natatória dos peixes (Videler, 1993). Os efeitos da temperatura sobre a natação podem ser divididos em físicos e fisiológicos. Os primeiros dizem respeito às mudanças nas propriedades da água como massa específica e viscosidade, capazes de alterar a cinemática natatória através da força de arrasto (White, 2004). Já os efeitos fisiológicos são atribuídos às diferenças na cinética molecular e nas taxas de reações bioquímicas que convertem energia química em propulsão (Beamish, 1978). A relação encontrada entre temperatura e velocidade do piau é compatível com as variações encontradas para testes realizados com espécies de clima temperado. Em geral, a diminuição de aproximadamente 10 °C na temperatura da água, proporciona uma redução de 24 a 37% na capacidade natatória (TAB. 5.2).

TABELA 5.2  
Influência da temperatura na velocidade crítica de cinco espécies de peixe.

Espécie	Temp. 1 (° C)	Veloc. 1 (m/s)	Temp. 2 (° C)	Veloc. 2 (m/s)	$\Delta T$ (° C)	Variação	
						percentual na velocidade (%)	
<i>Oncorhynchus nerka</i>	15	4,12*	5	3,26*	10	29,8	Brett (1964)
<i>Salvelinus Namaycush</i>	17,5	0,53	8	0,35	9,5	35,2	Gibson e Fry (1953)
<i>Oncorhynchus kisutch</i>	23	7,5*	13	5,7*	10	24,0	Glova e McInerney (1977)
<i>Perca flavescens</i>	20	0,33	10	0,245	10	25,8	Otto e Rice (1974)
<i>Perca flavescens</i>	10	0,21	20	0,335	10	37,3	Otto e Rice (1974)

Os chamados efeitos físicos da temperatura normalmente são relevantes quando o peixe nada em regimes hidrodinâmicos viscosos e podem ser negligenciados em regimes inerciais (Fuiman and Batty, 1997). As velocidades natatórias, presentes na rotina da maioria dos peixes adultos, os colocam no regime hidrodinâmico inercial com  $Re_L > 10^4$  (Wu, 1977). Dessa forma, os efeitos fisiológicos foram os prováveis responsáveis pela diferença significativa entre a velocidade do piau, que nada em temperatura mais altas, e as demais espécies de clima temperado.

Assim, embora as velocidades obtidas para o piau sejam superiores às das espécies de clima temperado, elas são compatíveis com as velocidades esperadas para a faixa de temperatura em que foram realizados os testes.

Apesar da velocidade crítica ser uma poderosa ferramenta para comparação da capacidade natatória entre as espécies (Hammer, 1995), o seu emprego em critérios de dimensionamento de passagens de peixes é limitado, uma vez que esta velocidade é menor que a velocidade desenvolvida em canais abertos (Peake, 2004) e possui pouco significado biológico. Testes de resistência permitem medir, mais precisamente, a habilidade do peixe em nadar durante um determinado tempo numa dada velocidade (Kolok, 1992). Assim, para o dimensionamento de mecanismos de transposição de peixes é mais usual o emprego da velocidade prolongada (Katopodis, 2005), a qual permite obter, de forma específica, quanto tempo (tempo de resistência) ou quão longe (distância nadada) um determinado peixe resiste em um dado escoamento (Katopodis, 1994).

Para o mandi, velocidades entre 5 e 6,2 comprimentos por segundo corresponderiam ao modo prolongado, enquanto velocidades inferiores a 5 comprimentos por segundo corresponderiam ao modo sustentável. Assim, para um indivíduo com tamanho próximo ao de primeira maturação (19 cm), valores inferiores a 0,95 m/s e entre 0,95 e 1,23 m/s corresponderiam às velocidades sustentável e prolongada, respectivamente.

Já para o piau, o modo prolongado está compreendido entre 7 e 10,5 comprimentos por segundo, o que para um indivíduo de primeira maturação (16 cm) corresponderia às velocidades entre 1,12 m/s e 1,68 m/s.

Desta maneira, percebe-se claramente que o piau apresenta velocidade superior ao mandi, suspeita antes levantada tendo em vista o comportamento das espécies na coluna d'água. O mandi normalmente nada no fundo enquanto o piau nada no meio da coluna.

Frente a uma barreira de velocidades, os peixes negociam sua passagem nos pontos cujas velocidades do escoamento são menores, ou próximas à sua capacidade natatória. Este mesmo comportamento confere, muitas vezes, uma separação das espécies frente ao perfil transversal de velocidade de um curso d'água. Assim, estudos indicam que, apesar das velocidades dos peixes de fundo serem tipicamente inferiores às apresentadas por peixes de coluna, a progressão migratória de ambos os grupos, em relação às margens do rio, podem ser equivalentes (Pavlov, 1989).

Para a curimba, as velocidades de 4 a 5,7 comprimentos por segundo correspondem ao modo prolongado. Portanto, quando comparados em termos de comprimento por segundo, o mandi e o piau seriam mais rápidos que a curimba. Entretanto, para o comprimento de primeira maturação (29 cm), a curimba apresenta o modo prolongado entre 1,16 e 1,60 m/s. Estes valores são superiores ao encontrados para um mandi e bastante próximos aos encontrados para um piau, para o comprimento de primeira maturação. Como o piau e a curimba devem vencer o perfil de velocidades na mesma região da coluna d'água, provavelmente indivíduos das duas espécies com tamanho próximo ao de primeira apresentam a mesma capacidade natatória em termos absolutos.

Além disto, é possível que outros fatores, como capacidade de saltar, condicionem a capacidade natatória da curimba. Através de observações nos pontos de coletas dos indivíduos testados, percebeu-se que a curimba utiliza muito este tipo de propulsão, diferentemente do piau, que salta em menor frequência, quando encontra altas velocidades. Esta observação também pode ser constatada nos testes de velocidade de explosão, onde foram testados piaus e curimbas.

Os testes de velocidade de explosão também indicaram que o piau apresenta velocidades em comprimentos por segundo superiores a da curimba, em comprimentos por segundo. Entretanto, em termos absolutos, as velocidades de explosão foram muito próximas.

A maior velocidade de explosão medida para o piau foi de 13 comprimentos por segundo enquanto para a curimba foi 9,5 comprimentos por segundo. Segundo Beach (1984), a



velocidade máxima que um peixe com 16 cm (tamanho de primeira maturação do piau) pode atingir numa temperatura de 20 C° são 15,6 comprimentos por segundo enquanto um indivíduo com 29 cm, tamanho de primeira maturação da curimba, atinge 13,3 comprimentos por segundo. Isto quanto maior o peixe, maior é a energia necessária para contrair o músculo rapidamente e desenvolver a explosão. Portanto, levando em consideração o maior porte da curimba, era esperado que a mesma apresentasse uma velocidade de explosão em comprimentos por segundo inferior ao piau.

Os resultados de capacidade natatória obtidos na presente tese constituem as primeiras velocidades determinadas em laboratório para peixes neotropicais. Até o presente momento, eram conhecidas apenas algumas observações qualitativas como, por exemplo, a de um *Leporinus friderici*, que realizou sua passagem numa queda d'água com velocidade de escoamento de 13,8 m/s (Godoy, 1985). Apesar das limitações dessa constatação, já que não se sabe o tamanho do peixe nem o tipo de velocidade empregado para vencer tal barreira de velocidade do escoamento, o valor verificado por Godoy constitui a única referência até então para a capacidade natatória de peixes neotropicais.

Assim, devido à ausência de informações básicas sobre a biologia de nossas espécies migradoras, algumas características básicas dessas espécies não tem sido levado em conta quando do projeto de mecanismos de transposição de peixes na América do Sul. Estes mecanismos têm se baseado, principalmente, naqueles construídos para passagens de montante de salmão (Quirós, 1989). A significativa capacidade natatória observada para as três espécies testadas poderia explicar o fato de que dispositivos de transposição já construídos no Brasil parecem não representar obstáculos para as três espécies testadas, as quais se mostram mais abundantes do que outras espécies migradoras como o dourado (*Salminus spp.*) (Fernandez, *et al.*, 2004; Vono *et al.*, 2004; Bizzoto, 2006; Pompeu, 2006).

No caso do piau, sua alta capacidade natatória pode justificar a eficiência do gênero em transpor o canal de entrada do elevador da UHE Santa Clara. Neste mecanismo, 16,1% dos indivíduos de *Leporinus conirostris* que se encontravam a jusante da barragem passaram pelo mesmo, contra 5,7 % de *Prochilodus vimboides* e 3,1 % da comunidade de peixes como um todo (Pompeu, 2005).

Como, em geral, os rios brasileiros se encontram significativamente alterados pela presença de usinas hidrelétricas, os mecanismos de transposição de peixes devem permitir o livre

movimento tanto dos peixes jovens como dos adultos. Se a transposição não possibilita isto, haverá uma concentração de cardumes logo a jusante do barramento. A presença de grandes cardumes de mandi a jusante de usinas hidrelétricas tem causado sérios problemas ambientais no Brasil. Na bacia do rio Paraná, eventos de mortandade de peixes, devido à entrada dos mesmos nos canais de sucção das turbinas, tem se tornado frequentes. O comportamento do mandi, o qual nada preferencialmente próximo às paredes e ao fundo do canal, e sua grande capacidade natatória, quando comparada aos peixes de clima temperado, devem contribuir para estes eventos de mortandade. Entretanto, a construção de mecanismos de transposição eficientes pode ser apontada como uma das possíveis soluções para este problema.

A eficácia de um dispositivo de transposição está relacionada às características migratórias das espécies em questão. Estudos com curimbas, gênero que em numero e em biomassa é o mais abundante em todos os rios da América do sul (Welcomme, 1985), mostraram que a mesma migra rio acima numa velocidade de 5 a 8 km/dia (Barthem & Goulding, 1997). Considerando a velocidade média da água de 1m/s, a velocidade de migração da curimba seria 1,09m/s o que para o comprimento de primeira maturação corresponderia à velocidade sustentável. Este valor é um parâmetro que pode auxiliar na escolha do tipo de velocidade natatória a ser empregado no dimensionamento de MTP.

A TAB. 5.3 apresenta um resumo das velocidades encontradas para as diferentes espécies em função de cada comprimento.

TABELA 5.3

Valores de velocidade medidas para o comprimento

	Comprimento (cm)	Velocidade Crítica (m/s)	Velocidade Prolongada (m/s)		Velocidade Explosão (m/s)
			Min	Max	
			Mandi	19	
Piau	16	1,32	1,12	1,68	1,58
Curimba	29	1,23	1,16	1,60	1,78

As velocidades máximas do escoamento em um mecanismo de transposição foram estimadas através de diferentes métodos. O método de Jones, Kiceniuk e Bamford (1974) forneceu valores baixos para as três espécies, o que era esperado já que é um critério bastante simplista e utilizado em mecanismos que não apresentam estruturas de dissipação de energia como no caso dos bueiros (*culverts*). Entretanto, os valores de velocidade máxima obtidos para a curimba e o piau, espécies cuja capacidade natatória prolongada é próxima quando considerado o comprimento de primeira maturação de seus indivíduos, apresentaram uma diferença de 39%. Além disso, a velocidade fornecida para o mandi, espécie de fundo, foi maior que as demais espécies.

O uso da velocidade crítica em dimensionamentos de MTP deve se limitar a estruturas mais simples, visto que a mesma possui pouco significado biológico.

TABELA 5.4

Velocidades (m/s) máximas em um mecanismo de transposição, obtidas pelos diferentes métodos

	Método da Velocidade Crítica (Jones, Kiceniuk e Bamford, 1974)	Método da Velocidade Prolongada (Katopodis, 1992)	Método de Velocidade de Explosão
Curimba	0,23	1,17	1,78
Piau	0,32	1,22	1,58
Mandi	0,47	1,16	

O método proposto por Katopodis (1992), baseado no uso da velocidade prolongada, forneceu valores mais razoáveis para as três espécies. A velocidade máxima obtida para curimba (1,17 m/s) foi próxima à do piau (1,22m/s) e ambas um pouco maiores do que do mandi.

Caso a velocidade de explosão, obtida nos testes, fosse utilizada como velocidade máxima de um escoamento, a escada projetada para curimba (1,78 m/s) teria fluxo mais rápido do que a projetada para o piau (1,58 m/s). No entanto, nos testes de explosão, indivíduos em estágio de maturação avançada não conseguiram desenvolver em laboratório tal velocidade. Desta forma, o uso da explosão como critério de dimensionamento é questionável uma vez que o principal objetivo é propiciar a passagem de peixes em condições de reprodução.

De uma forma geral, os resultados obtidos com os critérios de dimensionamento mostraram que os valores ideais para as espécies testadas são muito abaixo da velocidade máxima verificada na escada de Igarapava, 2m/s (Viana, 2005). Além disso, a passagem significativa de mandis verificada (Vono *et al.*, 2004) mostra uma possível falha destes critérios.

A simples alteração na abertura da ranhura é capaz de alterar o volume de concreto gasto na construção do canal. Para uma escada de 6% de inclinação, a mudança da abertura de 10 cm para 15 cm aumenta o volume em 4 % enquanto a alteração da abertura de 15 cm para 30 cm causa uma variação de 24,76% (TAB. 5.5)

TABELA 5.5  
Velocidades máximas e volumes de concreto em escadas do tipo slot vertical com diferentes aberturas e 6% de inclinação.

$b_o$	Velocidade (m/s)	Volume (m <sup>3</sup> )	$\Delta$ Volume (%)
0,1	1,11	685,47	
0,15	1,24	715,15	4,15
0,3	1,64	804,18	24,76

Também foram quantificadas as alterações nos custos construtivos que a adoção de determinada velocidade natatória é capaz de proporcionar. Considerando que a abertura da ranhura deve ser constante, permitindo a passagem do maior indivíduo e alterando as velocidades natatórias, foram obtidos os volumes de concreto para cada situação (TAB. 5.6). No caso da curimba, foram observadas variações de até 46% no volume entre os cenários que utilizavam a velocidade máxima prolongada e a velocidade de migração.

Quanto a análise das áreas viáveis de passagem, percebe-se a barreira de velocidade é bastante grande para todas as espécies e situa-se no fluxo principal da escada. Entretanto, como já comentado, pesquisas recentes demonstram que as espécies estudadas conseguem utilizar as escadas para transposição (Vono *et al.*, 2004).

Isso indica que muito provavelmente, os peixes, que utilizam a escada de Igarapava, devem desenvolver velocidades muito altas, de explosão, para vencer o fluxo principal. O acúmulo de ácido de láctico após esta passagem pode ser alto e condicionar as atividades posteriores a esta transposição.

Deve-se levar em consideração neste tipo de análise que a velocidade obtida dentro de respirômetros normalmente é menor do que desenvolvida em movimentos voluntários. Assim, os resultados obtidos com análise das áreas viáveis de passagem é mais uma confirmação desta afirmação.

TABELA 5.6

Volume de concreto em função da velocidade e da inclinação.

Curimba				
<i>Comprimento de Referência: 29 cm (primeira maturação)</i>				
Velocidade (m/s)	$b_o$ (m)	$s_o$ (m/m)	Volume (m <sup>3</sup> )	
1,16 (Limite inferior prolongado)	0,15	0,05	745,10	
1,60 (Limite superior prolongado)	0,15	0,09	534,78	
1,09 (Velocidade de migração*)	0,15	0,05	778,57	45,59 %
1,47 (Velocidade de explosão para 0,40 s)	0,15	0,08	596,92	
1,23 (Velocidade crítica)	0,15	0,06	711,64	
Piau				
<i>Comprimento de Referência: 16 cm (primeira maturação)</i>				
Velocidade (m/s)	$b_o$ (m)	$s_o$ (m/m)	Volume (m <sup>3</sup> )	
1,12 (Limite inferior prolongado)	0,10	0,06	672,86	
1,68 (Limite superior prolongado)	0,10	0,10	405,17	39,78 %
1,22 (Velocidade de explosão para 0,40 s)	0,10	0,07	625,06	
1,32 (Velocidade crítica)	0,10	0,07	577,26	
Mandi				
<i>Comprimento de Referência: 23 cm (comp. médio dos indivíduos testados na prolongada)</i>				
Velocidade (m/s)	$b_o$ (m)	$s_o$ (m/m)	Volume (m <sup>3</sup> )	
1,15 (Limite inferior prolongado)	0,15	0,05	665,08	
1,43 (Limite superior prolongado)	0,15	0,07	531,24	
1,47 (Velocidade crítica)	0,15	0,08	512,12	25,63 %

\*Velocidade de curimbas marcadas pela técnica de rádio telemetria em processo de migração (Barthem e Goulding, 1997)

De uma forma geral, os resultados dessa pesquisa fornecem importantes conclusões sobre a interação do peixe com o escoamento dentro da escada. No entanto, para que novos critérios de dimensionamento realmente eficientes, sejam propostos e validados, são necessárias pesquisas sobre a capacidade natatória de outras espécies bem como estudos do comportamento voluntário de peixes dentro de escadas.

## RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Estudo da capacidade natatória de outras importantes espécies migradoras como o dourado (*Salminus spp.*) e o surubim (*Pseudoplatystoma spp.*);
- Estudo da velocidade de explosão de forma mais específica, desenvolvendo outras técnicas de estímulo da explosão;
- Estudo dos limites de turbulência aceitáveis para as espécies de peixes neotropicais e interação desta característica com a capacidade natatória dos mesmos;
- Uso de técnicas de CFD em outros tipos de escadas de forma a verificar o modelo que melhor atende as características comportamentais e natatórias das espécies neotropicais.
- Revisão dos critérios de dimensionamento de mecanismos de transposição com auxílio das técnicas de CFD e modelos reduzidos.
- Estudo da capacidade natatória através do modo voluntário, possivelmente utilizando as técnicas de marcação como o PIT-TAG ou radiotelemetria.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGBAYANI, E., *Fish Base* 2005. Disponível em: < <http://www.fishbase.com/search.php> >  
Acesso em: 30 nov. 2005

ALEEV, Y. ; OVCHAROV, O. P. The three-dimensional pattern of flow round a moving fish. *Journal of Ichthyology*, v. 13, p. 933-936, 1973 *apud* LINDSEY, C. C. Form, function and locomotory habits in fish. In: HOAR, W. S.; RANDALL D. J., 1978, *Fish Physiology*, 1. ed. Londres: Academic Press, 1978. v. 7, cap.1, p. 1-100.

ALEXANDER, R. McN. *Dynamics of dinosaurs and other extinct giants*. New York: Columbia University Press, p.167, 1989 *apud* WEBB, Paul W. The biology of fish swimming. In: MADDOCK, L.; BONE, Q.; RAYNER, J. M. V. 1994, *Mechanics and physiology of animal swimming*, 1 ed. Cambridge: Harvard University Press, 1994, cap. 4, p. 45-62.

ALEXANDER, R. McN. The history of fish mechanics In: WEBB, P. W. ; WEIHS, D. *Fish biomechanics*, 1. ed. Nova York: Praeger Publishers, 1983, cap. 1, p. 1 – 35.

BAINDRIGDE, R. Problems of fish locomotion. *Symp. Zool. Soc. London*, v. 5, 1961, p. 13-32 *apud* LINDSEY, C. C. Form, function and locomotory habits in fish. In: HOAR, W. S.; RANDALL D. J., 1978, *Fish Physiology* , 1. ed. Londres: Academic Press, 1978. v. 7, cap.1, p. 1-100.

BAINDRIGDE, R.; BROWN, R. H. J. An apparatus for the study of the locomotion of fish. *Journal of experimental biology*, v. 35, p. 134-137, 1958.

BARTHEM, R. & GOULDING, M. *The catfish connection- ecology, migration and conservation of Amazon predators*. New York: Columbia University Press, 1997, 144 p.

BEACH, M. H., *Fish pass design-criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory*. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food - Directorate of Fisheries Research, v.78, p.1-46, 1984.



BEAMISH, F. W. H. Swimming capacity. In: HOAR, W. S. ; RANDALL D. J., 1978, *Fish Physiology* , 1. ed. Londres: Academic Press, 1978. v. 7, cap. 2, p. 101-187.

BELL, W. H. ; TERHUNE, L. D. B. Water tunnel design for fisheries research, *Fisheries research board of Canadá*, v. 195, p. 1- 69, 1970

BIZOTTO, P. M. *Trânsito de peixes na escada da UHE-Igarapava*, Rio Grande, Alto Paraná. 2006. 52f. Dissertação (Pós-graduação em Zoologia de Vertebrado), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BLAKE, R.W. *Fish Locomotion*. Cambridge: University Press, 1983, 208 p.

BODDEKE, R.; SLIJPER, E. J.; STELT, A. Histological characteristics of the body musculature of fishes in connection with their mode of life. *Proc. K. Ned. Akad. Wet. Ser. C Biol. Med. Scii*, v. 62, 1959, p. 576-588.

BOND, C. E. *Biology of fishes*. Philadelphia : W.B. Saunders, 1979, 514 p.

BONE, Q. Muscular and energetic aspects of fish swimming. In: WU, T. Y.; BROKAW, C. J.; BRENNEN, C. *Swimming and flying in nature*. New York: Academic Press, 1975. 493 p. *apud* WEBB, Paul W. *Swimming*. In: EVANS, David H., 1993, *The physiology of fishes*, 1 ed.. Londres: CRC, 1993. cap.2, p. 47-73.

BRETT, J. R. Swimming performance of Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v. 21, vol. 8, p. 1731-1741, 1967.

BRETT, J. R. The respiratory metabolism and swimming performance and sustained swimming speed of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Journal Fish. Res. Board Can.*, v. 23, p. 1183-1226, 1964.

BRETT, J. R.; GLASS, N. R.. Metabolic rates and critical swimming speeds of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to size and temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v. 30, p. 379-387, 1973.

CEMIG-CETEC, *Guia ilustrado de peixes da bacia do rio Grande*. 1 ed., Belo Horizonte: CEMIG/CETEC, 2000, 141 p.

CLAY, C. H. *Design of fishways and other fish facilities*, 2. ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. 248 p.

CONAMA, Resolução nº 20 18 jun. 1986.

DEPETRIS, P. J. ; PAOLINI, J. E. Biogeochemical Aspects of South American Rivers: The Paraná and the Orinoco IN: DEGENS, E. T., KEMPE, S. RICHEY, J. R. *Biogeochemistry of Major World Rivers*, Wiley: Scientific Committee On Problems of the Environment (SCOPE), 1991. v. 42, 382 p.

FARLINGER, S.; BEAMISH, F. W H. Effects of time and velocity increments on the critical swimming speed of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*) *Transaction american fisheries society*, n. 106, v. 5, p. 436- 439, 1977.

FERNANDEZ, D. R.; AGOSTINHO, A. A.; BINI, L. M. Selection of an experimental fish ladder located at the dam of the Itaipu Binacional, Paraná River, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 47, n. 4, p. 579-586, 2004.

FLOW SCIENCE, Disponível em: < [http://www.flow3d.com/cfd101/cfd101\\_main.html](http://www.flow3d.com/cfd101/cfd101_main.html) >  
Acesso em: 10 fevereiro 2007

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 5 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2001, 504 p.

FUIMAN, L. A.; BATTY, R. S. What a drag it is getting cold: partitioning the physical and physiological effects of temperature on fish swimming. *The Journal of Experimental Biology*, v. 200, p. 1745-1755, 1997.

GEBLER, R. –J. *Naturgemässe Bauweisen von Sohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Fliessgewässer*. 1991. 145 f. Tese, Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe, Karlsruhe

GIBSON, R. J. The behavior of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*) with regard to temperature and to water velocity. *Transactions of the American Fisheries Society*, v. 107, p. 703–712, 1978.

GIBSON, E. S.; FRY, F. E. The performance of the lake trout, *Salvelinus namaycush*, at various levels of temperature and oxygen pressure. *Canadian Journal of Zoology*, v. 32, p. 252-260, 1954.

GLOVA, G. J.; MCINERNEY, J. E. Critical swimming speeds of Coho Salmon (*Oncorhynchus kisutch*) fry to smolt stages in relation to salinity und temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v. 34, p. 151-154, 1977.

GODINHO, A. L.; POMPEU, P. S. A importância dos ribeirões para os peixes de piracema São Francisco, Brasil. In: GODINHO, H.P. & GODINHO, A.L. (Eds.) *Águas, peixes e pessoas no São Francisco das Gerais*. 1 ed., Belo Horizonte: PUC Minas, 2003, cap. 19, p. 361-372.

GODINHO, H. P.; GODINHO, A. L.; VONO, V. Peixes da bacia do rio Jequitinhonha. In: LOWE-MCCONNEL, R. H., 1999, *Estudos Ecológicos de Comunidades de Peixes Tropicais*, 1ed., São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999, cap. 18, p. 414-423.

GODOY, M. P. *Aquicultura. Atividade multidisciplinar. Escadas e outras facilidades para passagens de peixes. Estações de piscicultura*. Florianópolis: Eletrosul, 1985. 77p.

GONÇALVES JÚNIOR, A. A. *Metrologia*, Laboratório de Metrologia e Automatização, UFSC, 2001, 117 p.

GOPALKRISHNAN, R. , TRIANTAFYLLOU, M. S., TRIANTAFYLLOU, G. S. e BARRET, D. Active vorticity control in a shear flow using a flapping foil *Journal of Fluid Mechanics*, v. 274, p. 1-21, 1994

GRAY, J. Studies in animal locomotion- VI. The propulsive powers of the dolphin. *Journal of experimental biology*, v. 13, p. 192-199, 1936.

HAMMER, C. Fatigue and exercise tests with fish. *Comparative Biochemistry and Physiology*, v.112, n.1, p. 1-20, 1995.

JOHNSTON, I. A. Structure and function of fish muscle, *Symp. R. Soc. London*, v. 48, 1981 *apud* WEBB, Paul W. Swimming. In: EVANS, David H., 1993, *The physiology of fishes*, 1 ed.. Londres: CRC, 1993. cap.2, p. 47-73.

JONES, D. R.; KICENIUK, J. W. ; BAMFORD, O. S. Evaluation of the swimming performance of several fish species from the Mackenzie River, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v. 31, n. 10, p. 1641-1647, 1974.

KATOPODIS, C. *Introduction to Fishway Design*. Winnipeg: Freshwater Institute, 1992. 67p.

KATOPODIS, C. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat Works, *Journal of Hydraulic Research*, v. 43, n. 5, p. 451-467, 2005.

KOLOK, A. S. The swimming performance of individual largemouth bass (*Micropterus salmoides*) are repeatable. *Journal of Experimental Biology*, v. 170, p. 265-270, 1992.

LARINIER, M. Passes à bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles, *Bulletin Fr. Pêche Piscic.* n. 326 e 327, 1992, p. 45-72.

LARINIER, M. Fishways- General considerations. In: LARINIER M.; TRAVADE F.; PORCHER J. P., 2002, Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bulletin Fr. Pêche Piscic.*, nº364, cap 2, p. 21-27.

LIGHTHILL, M. J. Hydromechanics of aquatic animal propulsion. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v.1 p. 413-446, 1969. *apud* LINDSEY, C. C. Form, function and locomotory habits in fish. In: HOAR, W. S.; RANDALL D. J., 1978, *Fish Physiology*, 1. ed. Londres: Academic Press, 1978. v. 7, cap.1, p. 1-100.

LINDSEY, C. C. Form, function and locomotory habits in fish. In: HOAR, W. S.; RANDALL D. J., 1978, *Fish Physiology*, 1. ed. Londres: Academic Press, 1978. v. 7, cap.1, p. 1-100.

LOWE-MCCONNEL, R. H. *Estudos Ecológicos de Comunidades de Peixes Tropicais*, 1ed., São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999, 534 p.

MAGNUSON, J. J. Locomotion by scombrid fishes: hydromechanics, morphology, and behavior. In: HOAR, W. S.; RANDALL D. J., 1978, *Fish Physiology*, 1 ed., Londres: Academic Press, 1978. v. 7, cap. 4, p. 239-313.

MARSHALL, N. B. *Explorations in the life of fishes*. Cambridge: Harvard University Press, 1971 *apud* LINDSEY, C. C. Form, function and locomotory habits in fish. In: HOAR, W. S.; RANDALL D. J., 1978, *Fish Physiology*, 1. ed. Londres: Academic Press, 1978. v. 7, cap.1, p. 1-100.

MCCLEAVE, J. D. e STRED. K. 1975. Effect of dummy telemetry transmitters on stamina of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v. 32, n.4, p. 559-563.

MINAS GERAIS, Lei n. 12.488 de 9 de julho de 1997. Torna obrigatória a construção de escadas para peixes de piracema em barragem edificada no Estado. *Minas Gerais, Órgão Oficial dos Poderes do Estado*, Belo Horizonte, 10 abr. 1997.

NRM FISH COLLECTION, *The Mode of Terrestrial Locomotion in Clarias* 2004. Disponível em: < <http://www2.nrm.se/ve/pisces/clarias.shtml.en> > Acesso em: 24 nov. 2005

OTTO, R. G.; RICE, J. O. Swimming speeds of Yellow Perch (*Perca flavescens*) following an abrupt change in environmental temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v. 31, p. 1731-1734, 1974.

PARASIEWICZ P.; EBERSTALLER J.; WEISS S.; SCHMUTZ S. Conceptual guidelines for natural-like bypass channels. In JUNGWIRTH M.; SCHMUTZ, S.; WEISS, S., *Fish migration and fish bypasses*. Oxford: Fishing News Books, Blackwell Science. 1998. p. 348-362.

PAVLOV, D. S. *Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR*. Copescal Technical Paper, n<sup>o</sup>. 308, FAO, 1989. 97p.

PEAKE, S. An evaluation of the use of critical swimming speed for determination of culvert water velocity criteria for smallmouth bass, *Transaction american fisheries society*, v. 133, p. 1472-1479, 2004.

POMPEU, P. S. *Estudo da regra operativa e avaliação de um mecanismo de transposição de peixes do tipo elevador com caminhão-tanque*. 2005. 190 p. Tese (Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

POMPEU, P. S. & ALVES, C. B. M. Local fish extinction in a small tropical lake in Brazil. *Neotropical Ichthyology* . v.1, n. 2, p. 133-135, 2003.

POMPEU, P. S.; MARTINEZ, C. B. 2006. Variações temporais na passagem de peixes pelo elevador da usina Hidrelétrica de Santa Clara, rio Mucuri, leste brasileiro. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 23, n. 2, p. 340-349, 2006.

POPE, A. ; HAE, W. H. J. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons. 1966, 534 p.

PORCHER, J. P.; TRAVADE, F. Fishways: biological basis, limits and legal considerations. In: LARINIER M.; TRAVADE F.; PORCHER J. P., 2002, Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bulletin Fr. Pêche Piscic.*, nº364, cap1, p. 9-20.

QUIRÓS, R. *Sctructures assisting the migrations of non-salmonid fish: Latin America*. Copescal Technical Paper n. 5, Roma: FAO, 1989. 41p.

RAJARATNAM, N., VAN DER VINNE, G. e KATOPODIS, C. Hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*,v. 112, p. 909-927, 1986

REICMCHEN, T. E e TEMPLE, N. F. Hydrodynamic and phylogenetic aspects of the adipose fin in fishes. *Canadian Journal of Zoology*, v. 82, p. 910-916, 2004

REIS, R.E.; KULLANDER, S.O.; FERRARIS Jr., C.J. *Check list f the freshwater fishes of South and Central America*. Porto Alegre: EDIPUCRS. 2003, 742p.

RICHARDSON, E. G. The physical aspects of fish locomotion. *Journal of Experimental Biology*, v. 13, p. 63-74, 1936 *apud* ALEXANDER, R. McN. The history of fish mechanics In: WEBB, P. W. ; WEIHS, D. *Fish biomechanics*, 1. ed. Nova York: Praeger Publishers, 1983, cap. 1, p. 1 – 35.

RIZZO, E.; SATO Y.; FERREIRA, R. M. A.; CHIARINI-GARCIA, H.; BAZZOLI, N. Reproduction of *Leporinus reinhardti* (Pisces: Anostomidae) from the Três Marias Reservoir, São Francisco River, Minas Gerais, Brazil. *Ciência e Cultura*, v. 48, n. 3, p. 189-192, 1996

RYAN PHOTOGRAPHIC, *Gobiidae Gobies*. Disponível em: < <http://www.ryanphotographic.com/gobiidae.htm> > Acesso em : 24 nov. 2005

SANTOS, H. A., *Metodologia de Medição de Velocidade Prolongada Crítica e de Explosão das Espécies de Peixes Migradores do Brasil*, 2004. 140 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SÃO PAULO, Lei n. 9.798 de 7 de outubro de 1997. Dispõe sobre a construção de escadas para peixes em barragens em cursos de água de domínio do Estado. *Diário Oficial de São Paulo*, 107, São Paulo 8 out. 1997.

SATO, Y., CARDOSO, E. L. Reprodução induzida do mandi-amarelo (*Pimelodus maculatus*). In: ENCONTRO ANUAL DE AQUICULTURA DE MINAS GERAIS *Coletânea de resumos dos encontros da Associação Mineira de Aquicultura; 1982-1987*. Brasília: Codevasf, 1988. p.111-112.

SATO, Y.; GODINHO, H. P. A questão do tamanho de primeira maturação dos peixes de Três Marias, MG. In: ENCONTRO ANUAL DE AQUICULTURA DE MINAS GERAIS *Coletânea de resumos dos encontros da Associação Mineira de Aquicultura; 1982-1987*. Brasília: Codevasf, 1988. p. 93-94

SATO, Y.; GODINHO, H. P. Peixes da bacia do rio São Francisco. In: LOWE-MCCONNELL, R. H., 1999, *Estudos Ecológicos de Comunidades de Peixes Tropicais*, 1ed., São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999, cap. 17, p. 401-413.

SATO, Y.; GODINHO, H.P. Migratory fishes of the São Francisco River. In Carolsfeld J., Harvey B., Ross C. and Baer A. 2003. *Migratory fishes of South America*, Victoria: World Fisheries Trust, 2003, p. 195–232.

SFAKIOTAKIS, M.; LANE, D. M.; DAVIES, B. C., Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE Journal of oceanic engineering*, v. 24, n 2, p. 237-252, abril 1999.

THE FIELD MUSEUM, *The Field Museum* 2005. Disponível em: <<http://www.fieldmuseum.org/>> Acesso em : 29 nov. 2005

TRAVADE, F.; LARINIER, M. Fish Locks and Fish Lifts. In: LARINIER M.; TRAVADE F.; PORCHER J. P., 2002, Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bulletin Fr. Pêche Piscic.*, nº364, cap7, 102 a 118p.

TRIANAFYLLOU, M. S.; TRIANAFYLLOU, G. S. An efficient swimming machine. *Scientific American*, v. 272 , p. 40 – 46, mar. 1995.

URI SAKURA, *Hydro figure* 2005. Disponível em: < <http://uri.sakura.ne.jp/~dd/g/eg-098.htm> > Acesso em: 24 nov. 2005

VIANA, E. M. F. *Mapeamento do campo de velocidade em mecanismos de transposição de peixes do tipo ranhura vertical em diferentes escalas*. 2005. 226f. Tese (Doutorado) em Recursos Hídricos), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

VIDELER, J. J. *Fish swimming*, 1 ed., Londres: Chapman & Hall, 1993, 260 p.

VIDELER, J. J.; WEIHS, D. Energetic advantages of burst-and coast swimming of fish at high speeds. *Journal of experimental biology*, v. 97, 1982, p. 169-178.

VOGEL, S. *Life in moving fluids: The physical biology of flow*, 2 ed., Princeton: Princeton University Press, 1994, 467p.

VONO, V.; BIZZOTTO, P. M.; GODINHO, H. P.; GODINHO, A. L.; KYNARD, B. Fish passage at the Igarapava Fish Ladder, River Grande, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE BIOLOGY OF FISH, 2004, *Annals of the ...* Manaus: American Fisheries Society 2004. p. 1-5.

WEBB, P. W. Hydrodynamics an energetics of fish propulsion. *Bull. Fish Res. Board Can.*, v. 31, 1975, p. 1-159.

WEBB, P. W. Swimming. In: EVANS, David H., 1993, *The physiology of fishes*, 1 ed.. Londres: CRC, 1993. cap.2, p. 47-73.



WEBB, P. W. The biology of fish swimming. In: MADDOCK, L.; BONE, Q.; RAYNER, J. M. V. *Mechanics and physiology of animal swimming*, 1 ed. Cambridge: Harvard University Press, 1994, cap. 4, p. 45-62.

WEBB, P. W.; BLAKE, R. W. Swimming. In: HILDEBRAND, M.; BRAMBLE, D. M.; LIEM, K. F.; WAKE, D. B. *Functional vertebrate morphology*. Cambridge: Harvard University Press, 1985, 110p. *apud* WEBB, Paul W. Swimming. In: EVANS, David H., 1993, *The physiology of fishes*, 1 ed.. Londres: CRC, 1993. cap.2, p. 47-73.

WEIHS, D.; WEBB, P. W. Optimization of locomotion. In: WEBB, P. W.; Weihs, D. *Fish Biomechanics*, Nova York: Eds. Praeger, 1983, 339p.

WELCOMME, R. L. *River fisheries*. Copescal Technical Paper n. 262, Roma: FAO Fisheries, 1985. 330p.

WHITE, F. M. *Mecânica dos Fluídos*, 4 ed., Rio de Janeiro: McGraw –Hill, 2002, 570p.

WOLFANG, M. J., ANDERSON, J. M., GROSENBAUGH, M. A. YUE, K. P. e TRIANTAFYLLOU, Near-body flow dynamics in swimming fish, *The Journal of Experimental Biology*, v. 202, p. 1999. p. 2303-2327.

WU, T. Y. Introduction to the scaling of aquatic animal locomotion. In: PEDLEY, T. J. (Ed). *Scale Effects in Animal Locomotion*. New York: Academic Press, 1977. p. 203-232.