



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA MECÂNICA

“METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE

PRESSÃO E TURBULÊNCIA EM PEIXES”

VIVIANE PINTO FERREIRA MAGALHÃES

Belo Horizonte, 01 de Dezembro de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Viviane Pinto Ferreira Magalhães

**“METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE
PRESSÃO E TURBULÊNCIA EM PEIXES”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Calor e Fluidos

Orientador : Prof^o Carlos Barreira Martinez
(Universidade Federal de Minas Gerais)

Co-orientador : Prof^o Marco Túlio Corrêa de Faria
(Universidade Federal de Minas Gerais)

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2009



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av Antonio Carlos, 6627 – Pampulha – 31270-901- Belo Horizonte – MG

Tel.: ++ 55 31 3499-5145 3443-3783

www.demec.ufmg.br – E-mail cpgmec@demec.ufmg.br

“METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE PRESSÃO E TURBULÊNCIA EM PEIXES”

VIVIANE PINTO FERREIRA MAGALHÃES

Tese apresentada em 01 de dezembro de 2009 à Banca Examinadora definida pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **“Doutor em Engenharia Mecânica”** na área de concentração de **“Calor e Fluidos”**.

Prof^o Doutor Carlos Barreira Martinez – EEUFMG – **Orientador**

Prof^o Doutor Marco Túlio Corrêa de Faria – EEUFMG – **Co-orientador**

Prof^o Doutor Alexandre Lima Godinho – ICB -UFMG – **Examinador**

Prof^o Doutor Alexandre Augusto Barbosa – UNIFEI – **Examinador**

Doutor Domingo Rodriguez Fernandez– ITAIPU BINACIONAL– **Examinador**

Prof^a Doutora Edna Maria Faria Viana – EEUFMG – **Examinadora**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida.

Esta tese não teria sido concluída sem a ajuda de pessoas muito importantes e queridas.

Gostaria de agradecer à toda minha família pelo apoio incondicional durante toda a minha vida e a compreensão nos momentos de ausência. Sou imensamente grata ao meu querido Paulo Henrique pelo companheirismo, amizade e amor. Esta tese certamente não seria possível sem ele.

Agradeço ao Professor Martinez pelo apoio, amizade e confiança demonstrados em todos estes anos de convivência. Serei eternamente grata pelos ensinamentos e pelas diversas oportunidades que ele me proporcionou.

Gostaria também de agradecer aos demais membros da minha banca, pelas opiniões e sugestões de melhoria do trabalho.

Meu muito obrigada a todos os colegas do CPH, pelo ótimo ambiente de trabalho, em especial Cláudia, Luiz Gustavo, Flávio, Edna, David, Denise, Fernando, Renato, Doriana, Clodualdo, Mara e Danilo. Um agradecimento muito especial aos colegas César e Alessandra, Brenner e Mariana pela grande ajuda com os testes e manejo dos peixes e a todos que pelo CPH passaram, especialmente Hersília, Giuseppe e Paulo Pompeu.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG e à Capes pelo suporte financeiro.

Finalmente, agradeço a todos aqueles com quem tive a oportunidade de conviver e trabalhar e que participaram direta ou indiretamente do processo de conclusão deste trabalho. Muito obrigada!

“Se não fossem os nós, os bambus cresceriam mais rapidamente; contudo, sucumbiriam à primeira lufada de vento. Fortalecer o nó do bambu exige tempo e energia; porém é ele que proporciona segurança nas tempestades”.

(Provérbio japonês)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	09
LISTA DE TABELAS E QUADROS	15
LISTA DE GRÁFICOS	18
LISTA ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	21
RESUMO	23
1. INTRODUÇÃO	25
1.1. A produção de energia elétrica	25
1.2. Motivações para do trabalho proposto	27
1.3. Objetivo Geral	29
1.4. Objetivos Específicos	30
1.5. Estrutura do trabalho	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1. A construção de barragens nos cursos dos rios e o impacto da sua operação (problemas gerais)	32
2.2. O comportamento migratório dos peixes	33
2.3. A concentração de peixes no pé de vertedouro e casa de força	35
2.4. A transposição de peixes em barragens	37
2.4.1. Passagem para jusante e montante	37
2.4.2. A passagem de peixes pelo sistema gerador	40
2.4.3. A mudança do projeto nas máquinas hidráulicas	41
2.5. Variáveis hidráulicas envolvidas - impactos da heterogeneidade hidrodinâmica do escoamento	41
2.5.1. Danos indiretos	43
2.5.2. Aumento da pressão e descompressão rápida	44
2.5.3. A supersaturação de gases dissolvidos	54
2.5.4. Turbulência	59
2.5.5. Esforços cisalhantes	66
2.5.6. Cavitação	68
2.6. Sistemas sensoriais dos peixes e suas respostas às variáveis hidráulicas	69
2.7. Levantamento de parâmetros biológicos	70
2.7.1. Estudos sobre impactos na ictiofauna junto aos sistemas das usinas hidrelétricas	70
2.7.2. Passagens de peixes por turbinas	71

	7
2.7.3.	Turbinas “amigáveis” 71
2.7.4.	Considerações e critérios biológicos para o projeto de Turbinas “amigáveis” .72
	Fonte – Adaptado de Odeh, 1999. 73
2.7.5.	Aparatos desenvolvidos para levantamento de parâmetros biológicos 74
2.7.5.1.	Aparatos e técnicas para a determinação dos efeitos da variação de pressão e supersaturação 74
2.7.5.2.	Aparatos para a determinação dos efeitos de turbulência..... 80
2.7.5.3.	Aparato para o levantamento dos efeitos de cisalhamento..... 84
2.8.	A avaliação dos efeitos das variáveis hidráulicas nos peixes----- 86
2.8.1.	Avaliação dos danos diretos 86
2.8.1.1.	Observação externa..... 86
2.8.1.2.	Observação interna 89
2.8.2.	Avaliação dos danos indiretos 90
2.8.2.1.	Teste de reação 90
3.	METODOLOGIA..... 94
3.1.	Espécies testadas ----- 94
3.2.	Transporte e manutenção dos peixes em laboratório ----- 95
3.3.	Testes de pressão e descompressão - Aparato vertical ----- 99
3.3.1.	Escopo experimental - Aparato vertical 102
3.4.	Testes de pressão e descompressão - Aparato horizontal -----105
3.4.1.	Metodologia dos testes de variação de pressão no aparato horizontal 109
3.4.2.	Operação do aparato de pressão 113
3.4.3.	Marcação e acondicionamento em tanques de aclimação e observação..... 114
3.4.4.	Metodologia para a observação interna dos peixes – dissecação 116
3.5.	Testes de turbulência -----118
3.5.1.	Bancadas de testes 118
3.5.2.	Mapeamento da intensidade de turbulência na bancada..... 119
3.5.3.	Metodologia dos testes de exposição à turbulência..... 126
3.5.3.1.	Ajuste do Aparato experimental 127
3.5.3.2.	Teste de Turbulência 127
3.5.3.3.	Teste de reação pré e pós-turbulência..... 128
3.5.3.4.	Análise dos dados do teste de reação pré e pós-turbulência..... 130
3.6.	Tratamento estatístico -----131
4.	RESULTADOS 135
4.1.	Testes de pressão-----136

4.1.1.	Aparato vertical	136
4.1.2.	Bancada horizontal – Teste de Comissionamento.....	143
4.1.3.	Bancada horizontal de pressão – Testes	145
4.1.3.1.	Resultados dos testes de pressão - LAMBARI.....	145
4.1.3.2.	Análise de pressão - MANDI-AMARELO	151
4.1.3.3.	Comparação dos dados entre os indivíduos dos tipos MANDI-AMARELO e LAMBARI.....	158
4.2.	Comissionamento da bancada de turbulência-----	160
4.2.1.	Resultado do mapeamento de velocidade no interior do cesto.....	160
4.2.2.	Resultado do mapeamento da turbulência no interior do cesto.....	161
4.2.3.	Resultado do teste de reação.....	163
5.	ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	175
	ABSTRACT	182
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	183
	ANEXOS.....	205

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Estrutura da oferta segundo a natureza da fonte primária de geração de energia elétrica no Brasil e no mundo.	26
FIGURA 2.1- Foto do vertedouro em operação da Usina Hidrelétrica de Tucuruí no Rio Tocantins, a 350 km ao sul de Belém.....	36
FIGURA 2.2 – Regiões causadoras de danos na ictiofauna.....	43
FIGURA 2.3 – Bexiga natatória: (a) um peixe fisóstomo com bexiga natatória dorsal logo abaixo da coluna vertebral conectada ao sistema digestivo pelo duto pneumático; (b) conexão vascular da bexiga natatória de um fisóclisto que não é conectado ao sistema digestivo.	46
FIGURA 2.4 – Mortalidade em decorrência da redução brusca de pressão em testes realizados em laboratório.....	50
FIGURA 2.5 – Simulação de pressões críticas pela passagem de peixes por uma turbina Kaplan vertical da Usina de McNary – Início da trajetória a partir da superfície e a cerca de 9 metros de profundidade.	52
FIGURA 2.6 – Seqüência de pressão na trajetória do peixe que passa pela linha de centro de uma turbina tipo Bulbo horizontal após ter se aproximado da superfície da tomada d'água (101kPa) ou a uma profundidade de cerca de 9 metros (191kPa).	53
FIGURA 2.7 – Visão externa da hemorragia em um dos peixes testados, observada imediatamente após (foto esquerda) a variação brusca de pressão conduzida nos testes e após 48 horas (foto direita).....	53
FIGURA 2.8 – Solubilidade do oxigênio e nitrogênio em água e pressão de vapor da água (pressão atmosférica 760 mmHg).....	54
FIGURA 2.9 – Volume excedente de ar requerido para níveis específicos de ΔP	58
FIGURA 2.10 – Representação da flutuação da velocidade instantânea em relação á média em um escoamento turbulento.....	61

FIGURA 2.11 – Diferentes escalas de turbulência comparada ao tamanho dos peixes.....	63
FIGURA 2.12 – As oito regiões onde ocorrem o fenômeno da turbulência consideradas como as mais prejudiciais para os peixes.....	64
FIGURA 2.13 – Simulação em turbina amigável. Os pontos em destaque mostram as partes da turbina onde a taxa de cisalhamento atingem valores superiores a 500 /s.....	68
FIGURA 2.14 – Câmara hiperbárica e sistemas de operação para testes de descompressão: E) tubulação de alimentação, F) comportamento de acesso,G) abertura de visualização, H) bomba , J) válvula de descarga e tanque de acumulação, e K) reservatório.	75
FIGURA 2.15 – Sistema simulador de passagem por turbina.....	76
FIGURA 2.16 - Sistema simulador de passagem por turbina - B	77
FIGURA 2.17 – Efeito nos peixes no momento de descompressão rápida pelo simulador de passagem por turbina.	78
FIGURA 2.18 – Comparação entre os regimes de pressão durante a operação de uma Kaplan típica e sob uma Kaplan modificada, reduzindo a pressão mínima atingida.....	79
FIGURA 2.19 – Sistema para a supersaturação de gases dissolvidos na água e sensores de medição (saturômetro).....	80
FIGURA 2.20 – Diagrama esquemático da bancada de testes de turbulência	81
FIGURA 2.21 – Foto da câmara de turbulência da bancada de testes.	82
FIGURA 2.22– Tela de proteção na saída dos bocais de injeção.....	82
FIGURA 2.23 – a) Arranjo esquemático da bancada de testes; b) foto do tanque de observação e c) foto da área de estresse por turbulência.....	83
FIGURA 2.24 – Vista geral do reservatório e do canal em fibra de vidro utilizado nos testes de cisalhamento.	84
FIGURA 2.25 – Esquema geral de funcionamento do aparato de testes e foto do aparato mostrando o bocal cônico, o tubo inclinado para introdução dos peixes e uma das janelas laterais para observação.....	85

FIGURA 2.26 – Detalhe da filmagem no momento do teste de cisalhamento.	86
FIGURA 2.27 – a) erupção de bolhas na cavidade bucal de trutas adultas, b) enfisema sub-dermal na superfície externa da cabeça c) imagem microscópica dos filamentos das brânquias obstruídas por gases em um peixe que morreu por “trauma por bolhas de ar” d) exoftalmia extrema em uma truta juvenil.	88
FIGURA 2.28 – Detalhe de partes do organismo dos peixes geralmente afetadas pela doença das bolhas de ar : op- opérculo, br- brânquias, li- linha lateral, np – nadadeira (exemplo, nadadeira peitoral) e bn – bexiga natatória.....	88
FIGURA 2.29 – a) bolhas nos filamentos da brânquia, b) bolhas na nadadeira peitoral e c) bolhas nos olhos.	89
FIGURA 2.30 – Expansão excessiva da bexiga natatória de uma truta 48 horas após o teste de descompressão.	90
FIGURA 2.31 – Acumulação de bolhas de ar no átrio de um salmão após testes de descompressão sobre efeito de supersaturação.....	90
FIGURA 2.32 – A reação em “c” ou “reação –rápida” ou “começo rápido” de um salmão. De A a H é mostrado como se processa o movimento, sendo que de A a C é mostrado o estágio 1 de reação e de D a F caracteriza-se pelo estágio 2. O final do estágio 2 ocorre quando a cauda alcança sua amplitude máxima para o lado oposto do corpo na flexão inicial (H).	92
FIGURA 2.33 – A reação em “c” ou “reação –rápida” capturada por filmagem em alta velocidade de aquisição.	93
FIGURA 2.34– Teste de reação com predador	93
FIGURA 3.1 - <i>Pimelodus maculatus</i> (nome popular: mandi-amarelo).....	95
FIGURA 3.2 – <i>Astyanax bimaculatus</i> (nome popular: lambari-do-rabo-amarelo).....	95
FIGURA 3.3 - Aparato desenvolvido no CPH para a manutenção dos peixes	96
FIGURA 3.4 – Sistema de recirculação da água do aparato.	96
FIGURA 3.5 – Caixa do sistema de filtragem dos tanques de manutenção.....	97

FIGURA 3.6 - Aparato desenvolvido no CPH para a manutenção dos peixes durante processo de montagem.	98
FIGURA 3.7 – Local de coleta de mandi-amarelos no reservatório de FURNAS – Rio Grande- Minas Gerais.Vista dos tanques redes onde são capturados	99
FIGURA 3.8 – Seleção e acondicionamento dos peixes para o transporte até o laboratório do CPH-UFMG.	99
FIGURA 3.9 - Aparato vertical de avaliação dos efeitos de pressão em peixes. Detalhe da tampa superior, sua ligação com o painel de controle e da estrutura metálica de suporte.	101
FIGURA 3.10 – Aparato vertical de pressão- detalhe (a) Tampa inferior do aparato e (b) tampa superior do aparato experimental.....	101
FIGURA 3.11- Painel de controle do aparato experimental de pressão.....	102
FIGURA 3.12 – Divisão do aparato em níveis de observação.....	104
FIGURA 3.13 – Vista do aparato horizontal de pressão destacando a seção de teste em acrílico.	106
FIGURA 3.14 – Vista do aparato horizontal de pressão destacando a seção de teste em acrílico.	107
FIGURA 3.15 – Sistema de aquisição de dados de pressão.....	108
FIGURA 3.16 – Arranjo esquemático da bancada do aparato horizontal de pressão.	113
FIGURA 3.17 – Exemplo de um mandi-amarelo com a identificação por marcas coloridas nas nadadeiras e de um lambari.	115
FIGURA 3.18 – Exemplo do equipamento de marcação utilizado.	116
FIGURA 3.19 – Dissecção de um mandi-amarelo após 96 horas do término do teste de pressão. Detalhe para avaliação das condições da bexiga natatória.....	117
FIGURA 3.20 – Instrumentação e procedimento preparatório para a narcose antes da dissecção.....	117

FIGURA 3.21 – (a) Vista lateral do aparato de teste com destaque para as quatro colunas de injeção submersa de água. (b) Detalhe das tubulações verticais perfuradas para a injeção. ...	119
FIGURA 3.22 – Detalhes do sistema de emissão e recepção do ADV.	120
FIGURA 3.23 – Vista lateral e superior do sistema de posicionamento do ADV.	121
FIGURA 3.24 – Mapa chave dos pontos a serem coletados pelo ADV.	122
FIGURA 3.25 – Processamento dos dados coletados para um ponto na faixa 30 cm/s a partir do <i>software</i> WinADV.	123
FIGURA 3.26 – Processamento dos dados coletados para um ponto na faixa 100 cm/s a partir do <i>software</i> WinADV.	123
FIGURA 3.27 – Desenho esquemático da bancada de testes com destaque para os pontos de medição da intensidade de turbulência na seção de teste. Vistas superior e lateral.	124
FIGURA 3.28 – Mapeamento da turbulência com o ADV no interior do cesto.	125
FIGURA 3.29 – Sistema de bombeamento de água do aparato de turbulência.	125
FIGURA 3.30 – Vista geral do aparato experimental de turbulência.	126
FIGURA 3.31 – Foto do equipamento de filmagem para registro das imagens em alta velocidade com destaque para a imagem do monitor no momento do teste.	129
FIGURA 3.32 – Teste de Reação: 1) Início da reação; 2) C máximo; 3 e 4) Retorno da reação.	131
FIGURA 3.33– Taxa de formação do “C máximo”, Taxa = L/D.	131
FIGURA 4.1– Exemplo de hemorragia observada na região de ferrão ocorrida 0h após o teste.	139
FIGURA 4.2 – Hemorragia na região da boca para a observação 0h pós- teste e fungo 48h pós-teste.	139
FIGURA 4.3 – Foto do lambari “ <i>Astyanax bimaculatus</i> ” três dias após teste. Detalhe da permanência de exoftalmia.	144

FIGURA 4.4 – Representação da tela do equipamento de medição no momento do teste de descompressão súbita de 50 m.c.a para -8 m.c.a. com recuperação para pressão atmosférica.	145
FIGURA 4.5 – Exemplo das observações quanto o estado da bexiga natatória anterior e posterior de lambaris dissecados após os teste.	148
FIGURA 4.6 – Dissecção imediatamente após o teste de descompressão – 50 a -8 m.c.a..	154
FIGURA 4.7 – Dissecção 1h após o teste de descompressão – 50 a -8 m.c.a.....	155
FIGURA 4.8 – Dissecção de peixe não testado – detalhe para aparência da bexiga natatória.	155
FIGURA 4.9 – Dissecção após 22h do teste de descompressão – 50 a -8 m.c.a.....	155
FIGURA 4.10 – Dissecção 48h após o teste de descompressão – 50 a -8m.c.a. – Detalhe peritônio cheio de ar.	156
FIGURA 4.11 - Dissecções 48h após o teste de descompressão – 50 a -8 m.c.a. – Bexiga natatória com aparência de parcialmente recuperada.	156
FIGURA 4.12 – Mapeamento de velocidades ocorridas no interior do cesto de teste em (cm/s) iniciando pelos planos 1 e 2, seguidos dos planos 3, 4 e 5.....	160
FIGURA 4.13 – Planos de teste do aparato de turbulência.	162
FIGURA 4.14 – Mapeamento da energia cinética turbulenta (em cm^2/s^2) ocorridas no interior do cesto de teste, para os planos 1 e 5.	162
FIGURA 4.15 – Exemplo da captura quadro a quadro realizada a partir da filmagem do teste de reação antes da turbulência para espécie mandi-amarelo.	164
FIGURA 4.16 – Filmagem quadro a quadro do sexto teste de reação realizado nos mandis- amarelos (primeiro estímulo após a turbulência).	165

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2.1– Dados compilados sobre o índice de mortalidade de peixes em testes de decompressão realizados em laboratório para espécies do hemisfério norte.....	49
TABELA 2.2 - Lista de critérios e considerações biológicas para projetos de turbinas amigáveis.....	73
TABELA 2.3 - Pressões e duração durante a série de vazão reproduzida em laboratório.....	77
TABELA 3.1- Tempo mínimo para pressurização e decompressão do aparato vertical, para duas pressões testadas.....	102
TABELA 3.2 – Comprimento total médio dos mandis-amarelos submetidos a testes de pressão máxima de 10 m.c.a e decompressão imediata.	103
TABELA 3.3 – Comprimento total médio dos mandis-amarelos submetidos a testes de pressão máxima de 50 m.c.a e decompressão imediata.	103
TABELA 3.4 - Pressão e tempo de permanência ao longo do trajeto de transposição para jusante passando pela turbina	110
TABELA 3.5 – Número de indivíduos testados em cada cenário de variação de pressão.....	111
TABELA 3.6 – Descritiva dos peixes utilizados no estudo.	131
TABELA 3.7 – Exemplo de entrada de variáveis para o teste de McNemar em tabela 2x2 e classificação de dados pareados	132
TABELA 3.8 – Contingência para o teste do qui-quadrado.....	134
TABELA 4.1- Percentagem de mandi-amarelos afetados após o teste de pressão a 10 m.c.a. e decompressão imediata	137
TABELA 4.2 – Percentagem de mandi-amarelos afetados após o teste de pressão a 10 m.c.a. e decompressão imediata considerando apenas os exemplares pequenos (menores que 15cm de comprimento total) - <i>Mandi-amarelo</i>	138

TABELA 4.3 – Percentagem de mandi-amarelos afetados após o teste de pressão a 10 m.c.a. e descompressão imediata considerando apenas os exemplares médios (de 15 a 20 cm comprimento) -- <i>Mandi-amarelo</i>	138
TABELA 4.4 – Percentagem de mandi-amarelos afetados após o teste de pressão a 10 m.c.a. e descompressão imediata considerando apenas os exemplares grandes (maiores que 20 cm comprimento) - <i>Mandi-amarelo</i>	138
TABELA 4.5 – Percentagem de mandis afetados após o teste de pressão a 50 m.c.a. e descompressão imediata - <i>Mandi-amarelo</i>	141
TABELA 4.6 - Percentagem de mandis afetados após o teste de pressão a 50 m.c.a. e descompressão imediata, considerando apenas os exemplares pequenos (menores que 15 cm comprimento total)- <i>Mandi-amarelo</i>	141
TABELA 4.7 – Percentagem de mandis afetados após o teste de pressão a 50 m.c.a. e descompressão imediata, considerando apenas os exemplares médios (de 15 a 20 cm comprimento)- <i>Mandi-amarelo</i>	142
TABELA 4.8 – Dimensões dos indivíduos testados	143
TABELA 4.9 - Resultados para a espécie “ <i>Astyanax bimaculatus</i> ” (lambari).....	143
TABELA 4.10 - Resultados para a espécie “ <i>Mandi-amarelo</i> ” (mandi-amarelo).....	143
TABELA 4.11 - Comportamento dos peixes durante o ensaio	144
TABELA 4.12 – Proporção das ocorrências de eventos para o peixe lambari, quando submetido à pressão de 50 m.c.a..	150
TABELA 4.13 – Proporção das ocorrências de eventos para o peixe mandi-amarelo, quando submetido à pressão de 30 m.c.a. e de 50 m.c.a..	157
TABELA 4.14 – Comparação das proporção das ocorrências de eventos entre os peixes Mandi-amarelo e Lambari, quando submetido à pressão de 50 m.c.a.	159
TABELA 4.15 - Resultados do mapeamento da turbulência no interior do cesto	161

TABELA 4.16 – Média das reações do peixe mandi-amarelo, quando submetido à turbulência.	172
TABELA 4.17– Resultados obtidos pelo Teste de Kruskal-Wallis para os dados de turbulência – mandi-amarelo (verificação da correlação para os intervalos -15min,-20min,1min,5min e 10min)	173
TABELA 4.18– Teste de Wilcoxon para os dados de turbulência – mandi-amarelo	173
TABELA 4.19- Verificação do “tempo de retorno” e da “taxa de variação do C máximo”, utilizando o procedimento GLM software SAS, para duas classes (Grupo e Cativoiro)	174

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 – Relação entre o comprimento total e peso corporal dos mandis-amarelos testados no aparato vertical.....	104
GRÁFICO 3.2 – Resultado do comissionamento do aparato horizontal de pressão e sua repetibilidade para os testes de três baterias (A,B e C).	109
GRÁFICO 4.1 - Percentagem dos peixes nos diferentes níveis durante o teste de 10 m.c.a.	136
GRÁFICO 4.2 - Condições após o teste de descompressão a 10 m.c.a. – Aparato vertical. .	137
GRÁFICO 4.3 - Posição dos peixes nos diferentes níveis para o teste a 50 m.c.a.	140
GRÁFICO 4.4- Condições dos peixes após o teste de descompressão de 50 m.c.a.....	142
GRÁFICO 4.5 – Percentual da ocorrência da condição “ nada aparente” após o teste.....	146
GRÁFICO 4.6 - Percentual da ocorrência da variável “ morte” após o teste.....	146
GRÁFICO 4.7 - Percentual da ocorrência da variável “ heomorragia” após o teste.....	146
GRÁFICO 4.8 - Percentual da ocorrência da variável “ exoftalmia” após o teste.....	147
GRÁFICO 4.9 - Percentual da ocorrência da variável “ danos” após o teste.....	147
GRÁFICO 4.10 - Percentual da ocorrência da variável “ bolhas” após o teste	147
GRÁFICO 4.11- Observações da ocorrência de danos internos causados nos indivíduos (Lambaris) após o teste.....	149
GRÁFICO 4.12 – Observações dos danos na bexigas causados nos indivíduos (Lambaris) após o teste	149
GRÁFICO 4.13 – Ocorrência de hemorragia nos mandis-amarelos após o teste de 50 a -8 m.c.a.	151
GRÁFICO 4.14 –Ocorrência de hemorragia nos mandis-amarelos após o teste de 30 a -8 m.c.a..	152
GRÁFICO 4.15 – Ocorrência de danos nos mandis-amarelos após o teste de 50 a -8 m.c.a..	152

GRÁFICO 4.16 – Ocorrência de danos nos mandis-amarelos após o teste de 30 a -8 m.c.a..	153
GRÁFICO 4.17 – Ocorrência de nada aparente nos mandis-amarelos após o teste de 50 a -8 m.c.a.	153
GRÁFICO 4.18 – Ocorrência de nada aparente nos mandis-amarelos após o teste de 30 a -8 m.c.a.	154
GRÁFICO 4.19– Média e desvio padrão do “tempo de reação” para todos os mandis-amarelos testados.	166
GRÁFICO 4.20 – Média e desvio padrão do “tempo para formação do C máximo” para todos os mandis-amarelos testados	166
GRÁFICO 4.21 – Média e desvio padrão do “tempo de retorno” para todos os mandis- amarelos testados.....	167
GRÁFICO 4.22 – Média e desvio padrão da “taxa de formação do C máximo” para todos os mandis-amarelos testados.	167
GRÁFICO 4.23 – Média e desvio padrão do “tempo de reação” para o grupo de peixes com permanência de 10 meses em laboratório.....	168
GRÁFICO 4.24 – Média e desvio padrão do “tempo para formação do C máximo” para o grupo de peixes com permanência de 10 meses em laboratório.....	168
GRÁFICO 4.25 – Média e desvio padrão do “tempo de retorno” para os peixes com permanência de 10 meses em laboratório.....	169
GRÁFICO 4.26 – Média e desvio padrão da “taxa de formação do C máximo” para os peixes com permanência de 10 meses em laboratório.....	169
GRÁFICO 4.27 – Média e desvio padrão do “tempo de reação” para os peixes com permanência de 3 semanas em laboratório.....	170
GRÁFICO 4.28 – Média e desvio padrão do “tempo para formação do C máximo” para os peixes com permanência de 3 semanas em laboratório.....	170

GRÁFICO 4.29 – Média e desvio padrão do “tempo de retorno” para os peixes com permanência de 3 semanas em laboratório	171
GRÁFICO 4.30 – Média e desvio padrão da “taxa de formação do C máximo” para os peixes com permanência de 3 semanas em laboratório	171

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ADV	<i>Acoustic Doppler Velocimeters</i>
AHTS	<i>Advanced Hydropower Turbine System</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARL/NREC	<i>Alden Research Laboratory / Northern Research and Engineering Corporation</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i>
CETEC	Centro Tecnológico de Minas Gerais
CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos
C _s	Concentração de saturação de oxigênio dissolvido a uma determinada temperatura [mg/L]
DOE	<i>U.S. Department of Energy</i>
ds	Distância [m]
dv	Gradiente de velocidade do escoamento [m/s]
EIA	Energy Information Administration
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	Electric Power Research Institute
EUA	Estados Unidos da América
et al.	Et alii: e outros
etc.	etcétera: e outros
GBT	Gas Bubble Trauma

IEA	International Energy Agency
IT	Intensidade de turbulência
n	Número de medidas de velocidade instantâneas coletadas
NHA	<i>National Hydropower Association</i>
OD%	Porcentagem do gás oxigênio dissolvido
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PNNL	<i>Pacific Northwest National Laboratory</i>
PTG	Pressão total de gases
PVC	Cloreto de polivinila
RMS	Root-mean-square
SGD	Saturação dos gases dissolvidos
SP	São Paulo
S/R	Relação sinal/ruído
TKE	Energia cinética turbulenta (<i>Turbulent Kinetic Energy</i>) [cm^2/s^2]
UHE	Usina Hidrelétrica
USACE	<i>United State Corps of Engineeriers</i>
u',v',w'	Variação da velocidade na direção x, y e z em relação à velocidade média
v_{ave}	Velocidade média
v_i	Velocidade instantânea medida
ΔP	Diferença entre PTG e a pressão atmosférica local
%PTG	Porcentagem da supersaturação dos gases dissolvidos

RESUMO

A construção de barragens nos cursos dos rios e a conseqüente formação de reservatórios podem alterar a qualidade da água e as condições do escoamento, assim como resultar na interrupção do deslocamento de peixes em determinados trechos. Mecanismos que permitam a passagem de peixes tanto para montante quanto para jusante das barragens vêm sendo desenvolvidos para minimizar, principalmente, os efeitos da interrupção dos movimentos migratórios das espécies alvo em um determinado rio. Estudos têm mostrado que a passagem de peixes por turbinas hidráulicas e vertedores constituem uma das principais causas de mortandade e danos associados à migração para jusante de barragens. Durante este trajeto os peixes podem ser submetidos a várias condições adversas, tais como variações súbitas e extremas de pressão, cavitação, cisalhamento, turbulência e choques mecânicos. Cada uma destas condições de estresse, encontradas junto às estruturas das usinas, podem potencialmente causar danos severos o suficiente para levar à morte direta; incluindo a descamação ou perda de camada mucosa, abertura excessiva de opérculos, decapitação, queimaduras, rompimento da bexiga natatória, hemorragias e outros danos internos. Por outro lado, mesmo quando as condições de estresse enfrentadas pelos peixes não são imediatamente letais, estes podem, ainda, tornarem-se fisiologicamente estressados ou desorientados e conseqüentemente mais susceptíveis à predação quando atingem o canal de fuga. Apesar da importância para a conservação das populações, informações quanto à resposta de peixes submetidos a estas condições adversas são muitas vezes incompletas para as espécies de peixes até hoje estudadas e inexistentes para as espécies brasileiras. Em resposta à demanda por um melhor entendimento quanto às condições hidrodinâmicas passíveis de provocar danos aos peixes, este trabalho teve como objetivo desenvolver metodologias e projetar aparatos experimentais capazes de gerar diferentes gradientes de pressão e turbulência. Duas espécies de peixes foram testadas: *Pimelodus maculatus*, o mandi-amarelo, representante da ordem dos Siluriformes e *Astyanax bimaculatus*, o lambari do rabo-amarelo, representante da ordem dos Characiformes. As respostas biológicas para os testes de variação brusca de pressão foram analisadas em termos da ocorrência de danos diretos em curto e médio prazo, a partir de observações realizadas em laboratório. As respostas biológicas, decorrentes dos testes de permanência em condições de turbulência, foram analisadas em termos da ocorrência de danos diretos e indiretos, relacionados à alteração na capacidade de reação, condição diretamente relacionada à vulnerabilidade em ataques predatórios. Espera-se que as metodologias propostas a partir deste trabalho possam servir de base para a análise e o

desenvolvimento de critérios biológicos a serem utilizados por órgãos ambientais reguladores para o projeto de novas turbinas, mecanismos para transposição e regras operativas de usinas.

***Palavras-chave:** mecanismos de transposição para peixes, variáveis hidrodinâmicas, pressão, turbulência, migração para jusante, passagem de peixes por turbinas.*

1. INTRODUÇÃO

A busca do homem pelo desenvolvimento e a tentativa de gerenciamento dos recursos naturais têm alterado o curso natural dos rios em todo o mundo.

A definição da palavra desenvolvimento está associada originalmente à idéia de crescimento, progresso ou avanço econômico, social e político, caracterizado por altos índices de rendimento dos fatores de produção, recursos naturais, capital e trabalho (Ferreira, 1986). Esta definição limita-se a uma visão estreita do desenvolvimento, associado ao crescimento econômico, não avaliando as diferenças qualitativas entre uma proposta de desenvolvimento "bom" e um desenvolvimento que incorpora muitos erros, onde pesam as conseqüências. Estas conseqüências se refletem no baixo grau de satisfação das necessidades humanas e de grande parte da população, e em custos ambientais transferidos para a sociedade pelos processos adotados para o crescimento da produção.

Como relata Gonçalves (2005), o conceito de desenvolvimento sustentável surgiu a partir dos estudos da Organização das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas, no início da década de 1970, como uma resposta à preocupação da humanidade, diante da crise ambiental e social que se abateu sobre o mundo desde a segunda metade do século passado. Esse conceito que se consagrou com a Agenda 21 (1992), implica, em primeiro lugar, a melhora da eficiência do uso de matérias primas, energia, das atividades econômicas, do uso do espaço superficial, mas também a manutenção, em longo prazo, das funções potenciais da natureza. Atualmente este é um dos temas indispensáveis na pauta de discussão das mais diversas organizações e nos mais diferentes níveis de organização da sociedade.

1.1. A produção de energia elétrica

A manutenção das atividades humanas está cada dia mais dependente da produção de energia. E esta demanda cresce ano a ano. Segundo *Energy Information Administration - EIA* (2008), estima-se um crescimento de 50% da demanda por energia comercial até 2030.

Diante deste cenário, as fontes renováveis de energia vêm ganhando destaque e incentivos para sua utilização em diversos países. Este recente interesse é resultante da necessidade mundial em se criar alternativas às reservas de fontes finitas de energia, geralmente

concentradas em poucas regiões do globo e que se apresentam, historicamente, como fontes de emissão de poluentes.

A produção por centrais hidrelétricas, que atualmente é a única considerada renovável em grande escala (*International Energy Agency - IEA, 1995*), como alternativa à geração por combustíveis fósseis, representa cerca de 16% de toda a eletricidade produzida no mundo, conforme mostrado na FIGURA 1.1.

De acordo com dados do último balanço energético nacional da Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2008), o Brasil apresenta uma matriz de geração de origem predominantemente renovável, com aproximadamente 75% da oferta sendo atendida por geração interna de fonte hidráulica. Somando-se às importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que mais de 80% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis – sem considerar que parte da geração térmica é originada de biomassa, FIGURA 1.1.

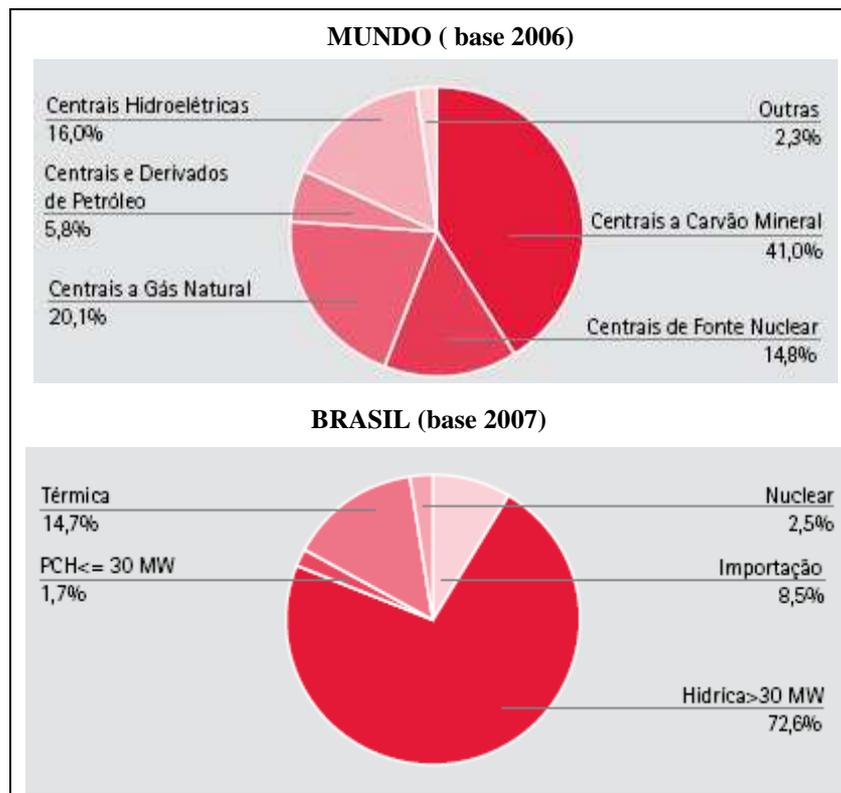


FIGURA 1.1 - Estrutura da oferta segundo a natureza da fonte primária de geração de energia elétrica no Brasil e no mundo.

FONTE – Adaptado de EPE, 2008.

O Brasil se destaca entre os 66 países que geram pelo menos metade de sua eletricidade através de hidrelétricas, incluindo grandes economias tais como o Canadá (62% da produção nacional de energia) e a Noruega (99% da produção nacional de energia) (IEA, 1995).

A hidroeletricidade é considerada a mais eficiente e confiável entre todas as fontes de energia renováveis. A relativa simplicidade do processo de geração, ou seja, a ausência de combustão, e sim conversão de energia mecânica em eletricidade, explica seu alto índice de eficiência. Centrais hidrelétricas geralmente operam com índice de eficiência em torno de 85% a 95%, muito superior aos geralmente praticado por turbinas a gás (cerca de 55%), usinas termoelétricas à carvão e à diesel (30% a 40%), produção de energia eólica (7%) e de painéis fotovoltaicos com cerca de 17% de eficiência (IEA, 2000).

A produção de energia por hidroelétricas apresenta questões particulares no que se refere ao desenvolvimento e implantação de suas estruturas, pois reúne grandes benefícios e alguns difíceis desafios ambientais (March e Fisher, 1999).

1.2. Motivações para do trabalho proposto

A implantação e operação de usinas hidrelétricas, incluindo a construção de barramentos e reservatórios, podem gerar impacto de ordem social, econômico e geofísico, assim como intensas alterações na qualidade da água, clima, flora e fauna locais (Mattice, 1991; Jackson e Marmula, 2001).

Dentre os impactos decorrentes da implantação de empreendimentos hidroelétricos, muitos estão intrinsecamente correlacionados à sobrevivência da ictiofauna. Assim, umas das questões que frequentemente desafiam a indústria hidroelétrica estão relacionadas à:

- restrição e atrasos que os barramentos representam para o trânsito dos peixes, principalmente em seu deslocamento para montante em rotas migratórias;
- mortalidade e lesões decorrentes da passagem dos peixes por unidades geradoras e estruturas de vertimento;
- mudanças na qualidade e quantidade de águas descartadas à jusante das barragens, junto aos pés de vertedouros e canais de fuga (Sale et al., 1991; Schilt, 2007).

Alguns sistemas vêm sendo propostos para permitir o trânsito dos peixes de jusante para montante e vice-versa do barramento, com o intuito de mitigar os efeitos causados pela

interrupção de rotas migratórias. Entretanto, apesar do avanço e disponibilidade de tecnologias que promovem o restabelecimento da passagem dos peixes por empreendimentos hidroelétricos, isso não garante que barragens e outras instalações no curso dos rios possam ser implantadas sem causar problemas.

Alguns danos causados pelo aumento do número de instalações nos cursos dos rios são praticamente irreparáveis, resultantes do alagamento de *habitat* de desova e crescimento, alterações nas características físico-químicas da água ou modificações no regime hidráulico do escoamento (Harris e Gehrke,1997; Horváth e Municio,1998).

Portanto, permitir o trânsito dos peixes é apenas um dos aspectos para a manutenção dos estoques de populações migratórias, não garantindo a total reconstituição do ambiente afetado.

O Setor Elétrico brasileiro tem encontrado dificuldades no trato das questões referentes à fauna aquática, devido à falta de compreensão da estrutura e funcionamento dos ambientes e das respostas da fauna às medidas de manejo implantadas (Eletrobrás, 1995). As ações implantadas têm se baseado em modelos teóricos desenvolvidos em países de clima temperado, que apresentam condições ambientais diferentes da brasileira, levando muitas vezes à implantação de sistemas ineficientes. O monitoramento do grau de diversidade ictiofaunístico do ambiente e a avaliação das ações implantadas não têm sido sistematicamente realizados.

Quando os peixes realizam a passagem pelas barragens para jusante, particularmente através das turbinas ou através das descargas por vertedouros, tornam-se expostos a condições hidráulicas muito desfavoráveis, podendo ser mortos ou sofrerem vários tipos de lesões (Cada *et al.*, 1997; Turnpenny, 1998; Larinier, 2001; Larinier *and* Vigneux, 2002)

Não são raros os registros de mortandade de peixes em decorrência da operação de usinas no Brasil. Há muito a ser estudado sobre os efeitos e a extensão dos danos causados pelos sistemas das unidades geradoras (incluindo o tubo de sucção e o canal de fuga), assim como a importância da mortandade indireta e os efeitos da passagem de peixes por turbinas.

O conhecimento do comportamento e das taxas de mortalidade/lesões de espécies de peixes nativas do Brasil, quando submetidas a variações das condições hidráulicas é fundamental para a mitigação de impactos de barramentos hidrelétricos, em especial aqueles relacionados à

migração de montante para jusante. Somente a partir deste conhecimento será possível o desenvolvimento de tecnologia própria e avaliação de mecanismos de transposição para jusante como ferramenta para a conservação de nossos recursos pesqueiros.

Portanto, é complexa e urgente a necessidade pela busca de melhorias nos projetos e na operação de turbinas, assim como, pela criação de novas áreas de pesquisas, que envolvam trabalho de campo, experimentos e técnicas de modelagem, capazes de avaliar, analisar e propor novas tecnologias que venham a minimizar os impactos provocados pela passagem de peixes neotropicais para jusante. Este é um processo que exige estratégias integradas entre diversas áreas e profissionais, em especial, biólogos e engenheiros.

As lacunas apresentadas acima, aliada à ausência de informações biológicas de espécies brasileiras, motivou iniciar a discussão de questões referentes à passagem de peixes de montante para jusante de barragens de usinas hidrelétricas.

Procurou-se neste trabalho, através do levantamento bibliográfico, abranger questões relacionadas à transposição de peixes e descrever as principais condições hidrodinâmicas desfavoráveis às quais os peixes, especificamente no seu trânsito para jusante, estão submetidos. A partir da análise dos estudos existentes na literatura e a demanda por parâmetros biológicos de espécies neotropicais, propõe-se neste trabalho a definição de metodologias para a caracterização dos efeitos resultantes da exposição de peixes a duas variáveis hidrodinâmicas: pressão e turbulência.

1.3. Objetivo Geral

Levantamento e análise das condições hidrodinâmicas desfavoráveis à ictiofauna junto às estruturas hidráulicas de usinas hidrelétricas e a definição de metodologias para a caracterização dos efeitos diretos e indiretos da turbulência excessiva e variação brusca de pressão em espécies de peixes neotropicais.

1.4. Objetivos Específicos

- Levantamento do estado da arte dos estudos referentes às condições hidrodinâmicas desfavoráveis à ictiofauna presentes em usinas hidrelétricas;
- Levantamento das metodologias e aparatos existentes para a caracterização dos parâmetros biológicos limitantes para o projeto e melhoria de sistemas de transposição de peixes;
- Definição de metodologias para a caracterização dos efeitos de pressão e turbulência em espécies de peixes neotropicais;
- Projeto e construção de aparatos experimentais;
- Realização de testes com indivíduos em laboratório para a verificação da resposta biológica de algumas espécies de peixes submetidos à:
 - i. Variação brusca de pressão;
 - ii. Turbulência.
- Avaliação e quantificação dos danos diretos e indiretos nos indivíduos testados;
- Análise e comparação dos resultados obtidos

1.5. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo, a Introdução, apresenta-se um panorama geral, que aborda temas relacionados ao cenário de geração de energia no Brasil e impactos causados pela implantação de barramentos nos cursos dos rios. Na seqüência são levantadas algumas questões quanto ao impacto à ictiofauna relacionado a transposição de barramentos e apresentadas as motivações que justificaram a escolha do tema proposto. Ao final são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho.

O capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, onde são apresentadas as características e o comportamento das espécies mais afetadas pelos impactos causados por barramentos hidrelétricos, a instalação de mecanismos de transposição para peixes como uma das formas que vem sendo utilizada para atenuação destes impactos, as principais variáveis hidráulicas resultantes da implantação dessas estruturas. Nesse capítulo apresentam-se, ainda, os estudos já realizados para o levantamento da magnitude e localização de ocorrência dos danos e impactos provocados na ictiofauna, assim como a caracterização dos efeitos.

Posteriormente, no capítulo 3 apresenta-se a metodologia proposta e descrevem-se os aparatos e sistemas desenvolvidos para a caracterização dos danos diretos e indiretos em indivíduos de duas espécies importantes de peixes neotropicais brasileiros.

O capítulo 4 apresenta os resultados dos testes realizados em laboratório nos aparatos de pressão e turbulência obtidos nos testes realizados em laboratório e correlaciona suas magnitudes com as magnitudes de campo apresentadas nas bibliografias discutidas no capítulo 2.

Finalmente, no quinto capítulo, apresentam-se as análises dos resultados e as considerações finais do trabalho, assim como as expectativas para as fases futuras de investigações dentro desta temática proposta.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A construção de barragens nos cursos dos rios e o impacto da sua operação (problemas gerais)

Apesar das barragens para a geração de energia representarem apenas 20% do total das maiores barragens atualmente construídas, enquanto um índice bem maior (48%) são construídas para fins apenas de irrigação (IEA, 2000), a atividade hidroelétrica, contraditoriamente, é a mais atingida por críticas em todo o mundo. Estas críticas, geralmente ligadas a questões sócio-ambientais, são originadas por diversos setores da sociedade que se articulam em oposição à construção de novos empreendimentos e, em alguns países, vêm recomendando a suspensão das atividades, até mesmo o descomissionamento imediato de algumas barragens já construídas.

O homem vem construindo barramentos e canais que, de alguma forma, têm interferido no regime natural dos rios há alguns milênios. Em 2600 AC, a primeira grande barragem foi construída em Sass El Kafara no Egito (Horvát *et al.*, 1998; Schnitter, 1994). Na maioria dos casos, as construções de barragens nos cursos dos rios vêm resultando em mudanças na biodiversidade e em muitos casos têm contribuído para a redução da abundância dos estoques de peixes (Larinier, 2001; Vazzoler *et al.*, 1997; Horvát *et al.*, 1998; Canadian Electricity Association, 2001; Young, 2003).

O desenvolvimento e utilização das vias navegáveis para produção de energia e outros usos industriais, têm alterado substancialmente muitos habitat de água doce do planeta e conseqüentemente causado impactos consideráveis aos organismos aquáticos presentes nestes ambientes (Richter *et al.*, 1997). Outras atividades humanas, tanto em nível local (extração de areia, pecuária extensiva, rizicultura, agricultura de subsistência e pesca) quanto regional (alteração na amplitude, época e freqüência das cheias em razão de barragens, agricultura com o emprego intensivo de produtos químicos, precariedade das práticas de conservação do solo e remoção de matas ciliares além da ocupação de sub-bacias afluentes por grandes centros urbanos e industriais), também têm contribuído para que alguns trechos de rios tenham sua fauna de peixes depauperada (Vazzoler *et al.*, 1997).

Os peixes presentes nos cursos dos rios são importantes em nossa sociedade não apenas por fazer parte da biodiversidade, mas também têm sido a base alimentar e fonte de proteína de várias comunidades por milhares de anos, além da pesca esportiva representar uma atividade sócio-recreativa para muitas pessoas (Horvát *et al.*, 1998).

Segundo Carvalho (2002), a construção de qualquer barragem, especialmente a construção de hidrelétricas, provoca a morte de peixes por razões diversas, dentre as quais o autor destaca:

- i. a ocorrência de super saturação de gases na água vertida, a qual, acima de certos níveis e dependendo de fatores como exposição ou temperatura (Petts, 1984), pode causar embolia nos peixes;
- ii. em decorrência da passagem acidental por turbinas e/ou vertedouro;
- iii. aumento da taxa de predação próximo à barragem;
- iv. diminuição ou mesmo impedimento da periodicidade e amplitude das cheias que atingem a planície e afetam o recrutamento e desova das espécies (Agostinho *et al.*, 1992).

Poucos e muitas vezes fragmentados são os estudos relativos a efeitos da construção de hidrelétricas nos ecossistemas fluviais no Brasil, em particular, a caracterização das populações de peixes à montante e à jusante, e de que modo e intensidade estas populações são afetadas.

2.2. O comportamento migratório dos peixes

Os peixes que durante sua vida realizam migrações são geralmente os mais afetados pelas interrupções nos curso dos rios. A migração, na sua forma mais simples, consiste no deslocamento dos peixes durante os estágios de sua vida entre vários habitat naturais.

De acordo com o comportamento migratório, os peixes podem ser divididos em duas grandes categorias – potádromos e diádromos - o primeiro se refere às espécies que migram em águas continentais, no sistema dos rios (Gresswell, 1997; Larinier, 2001), e o segundo grupo se refere àquelas espécies que passam estágios de sua vida tanto em águas continentais quanto em oceânicas (McDowall, 1995).

Os peixes classificados como diádromos podem ainda ser divididos em três subcategorias: anádromos, catádromos e anfídromos. Anádromos referem-se aos peixes que nascem em água doce, vivem no mar até a condição de sub adultos e quando atingem a maturidade migram rio acima para se reproduzirem. O exemplo mais conhecido é o salmão, espécie muito encontrada, sobretudo no hemisfério norte. Catádromos referem-se aos peixes que se alimentam, crescem e se desenvolvem nos rios e na maturidade migram e se reproduzem no mar. Já os anfídromos referem-se aos peixes que passam grande parte de suas vidas tanto nos rios quanto no mar, alimentando-se e desenvolvendo-se. Neste último grupo, rotas migratórias não apresentam relação direta com o processo reprodutivo (McDowall, 1995).

O processo migratório manifesta-se com várias intensidades nos peixes anádromos, potádromos e catádromos, diferenciando-os segundo os diferentes estágios dos seus ciclos de vida. O estudo da dinâmica migratória envolve as características espaciais e temporais mais importantes relacionadas ao comportamento dos peixes (Pavlov, 1989).

O Brasil possui uma admirável e numerosa diversidade de espécies nos diferentes grupos de vertebrados, sendo considerado o mais rico em diversidade de espécies de peixes de água doce do mundo (Sabino e Prado, 2003; McAllister *et al.*, 1997). Minas Gerais é um dos estados brasileiros com maior riqueza de espécies de peixes nativos, perdendo, apenas para aqueles drenados pela Bacia Amazônica, a mais rica do planeta. Há, no Estado, pelo menos 380 espécies, o que representa 12,5% do total estimado para o Brasil (McAllister *et al.*, 1997). Para se dimensionar esta diversidade, vale lembrar que a riqueza de peixes de todos os rios e lagos da Europa é cerca de 520 espécies, sendo cerca de 200 em risco de extinção (Kottelat *and* Freuhof, 2007). Um grande número de espécies brasileiras que se destacam pelo seu valor econômico e social apresenta comportamento migratório (Goulding, 1981; Agostinho, 1995).

A maioria das espécies migradoras brasileiras são potádromas, conhecidas no Brasil como peixes de piracema (Godinho e Kynard, 2008). Portanto, particularmente para os peixes brasileiros com hábitos migratórios, os barramentos podem constituir-se em um obstáculo para o livre trânsito entre seu sítio de alimentação para o de desova e seu posterior retorno após a reprodução.

O movimento migratório, principalmente o reprodutivo, nem sempre se apresenta constante num único sentido. Podem ocorrer avanços e recuos devido à exaustão e/ou período de repouso, linhas de corrente desfavoráveis ou estagnações devido à intransponibilidade, como

é o caso de barramentos desprovidos de dispositivos para sua transposição ou diante de grandes quedas d'água naturais (Pavlov, 1989).

Os padrões de migração mais comuns ocorrem com os potádromos e correspondem aos movimentos sazonais de retorno para áreas de desova. Estes movimentos geralmente envolvem uma migração ascendente de adultos para a desova e subsequente descida do rio para sítios de alimentação (McKeown, 1984).

Os estudos mais completos sobre migração são aqueles desenvolvidos para as espécies salmonídeas que foram e continuam sendo profundamente estudados nos Estados Unidos, Canadá, e em muitos outros países, especialmente de clima temperado. Estes estudos pioneiros têm contribuído para que sejam projetados e aperfeiçoados dispositivos que promovam o deslocamento mais eficiente e seguro dos peixes pelas barragens, principalmente para espécies como salmões, trutas e enguias que apresentam grande potencial econômico (Pavlov, 1989).

Apesar de fundamental para a manutenção dos estoques pesqueiros, no Brasil, pouca atenção tem sido dada aos problemas relacionados à manutenção dos deslocamentos dos peixes, que podem ser efetuados em diferentes fases do ciclo de vida de nossas espécies migradoras e também não migradoras presentes nos cursos dos rios.

Alguns estudos já foram realizados em cursos de rios, porém várias são as lacunas e as dúvidas quanto às características do comportamento migratórios de algumas espécies brasileiras (Carolsfeld *et al.*, 2004) e o impacto que a construção das barragens tem causado em seus padrões de deslocamento.

2.3. A concentração de peixes no pé de vertedouro e casa de força

A percepção do fluxo de corrente pelos organismos vivos tem um papel decisivo para a sua orientação na calha dos rios. Os peixes em seu deslocamento ao longo dos ambientes aquáticos, usualmente nadam contra corrente devido à propriedade de reotaxia positiva (Reo do grego *rheos* - corrente; taxia do grego *taxis* - disposição, arranjo) e utilizam-se de seus sistemas sensoriais para perceberem as características e se orientarem nos ambientes nos quais se encontram (Ferguson, 2005).

A implantação das estruturas que compõem um empreendimento hidroelétrico transforma as características antes encontradas nos cursos naturais sem barramentos; minimizando velocidades, como em reservatórios, ou maximizando velocidades e vazões, nas novas rotas disponíveis. Em consequência disto é comum a acumulação de cardumes de peixes próximos à região do canal de fuga e vertedouro, à jusante de barragens, que, atraídos pelo grande volume de água liberado por estas estruturas, funcionam como um sinal hidrodinâmico atrativo para os peixes que desejam deslocar-se para locais à montante no rio, FIGURA 2.1.



FIGURA 2.1- Foto do vertedouro em operação da Usina Hidrelétrica de Tucuruí no Rio Tocantins, a 350 km ao sul de Belém

FONTE: <http://sosriosdobrasil.blogspot.com/2008/12/trf-libera-obras-da-usina-de-jirau-e.html>

Recentemente descargas programadas de vertedouros vêm sendo realizadas para aumentar a sobrevivência da passagem de peixes para jusante de barragens. Muitos estudos têm concluído que os vertedouros constituem uma rota mais segura para passagem dos peixes quando comparada à passagem por turbinas, entretanto esta operação estratégica utilizada por alguns empreendimentos, principalmente na América do Norte, tem aumentado os níveis de gases dissolvidos na água à jusante dos vertedouros. Sabe-se que níveis de supersaturação de gases acima do administrável pelas espécies de peixe podem causar a formação de bolhas nos organismos destes indivíduos e potencialmente a morte (Ryan e Dawley, 1998; Schilt, 2007)

2.4. A transposição de peixes em barragens

2.4.1. Passagem para jusante e montante

A construção de barragem representa uma importante fonte de interferência para as populações de peixes nativos (Horvát *et al.*, 1998; CEA, 2001; Bernacsek, 1984; Lelek, 1987; Pavlov, 1989; Godinho, 1993; Godinho e Godinho, 1994; Swales, 1994; Clay, 1995; Larinier, 2001), principalmente os chamados reofílicos, que habitam os sistemas lóticos dos cursos d'água (Fernandez, 1995). Os peixes reofílicos em sua maioria realizam grandes deslocamentos entre regiões do rio, principalmente com a finalidade reprodutiva e/ou trófica (alimentar) e ocupação de nicho.

Com o objetivo de se atenuarem os impactos causados à ictiofauna com a construção de barragens nos cursos dos rios, em vários países vêm sendo desenvolvidos e implantados mecanismos de transposição para peixes (MTP). Os MTP são basicamente estruturas ou dispositivos que promovem a passagem dos peixes pelas barragens. Escadas, elevadores e eclusas e canais seminaturais para peixes são as principais soluções para a transposição de jusante para montante da barragem. Dentre estes tipos de mecanismos existem inúmeras variações de geometria e funcionamento adaptados à realidade de cada empreendimento e às características comportamentais das espécies alvo (Bell, 1973).

Embora o primeiro barramento artificial a ser dotado de facilidade de transposição date de 1828 (Godoy, 1985), foi no século XX que estas estruturas foram difundidas em todo o mundo, sendo consideradas como medidas adequadas de mitigação ao impacto decorrente do bloqueio interposto pelas barragens aos deslocamentos de peixes. O número destas obras, estimado para todo o mundo, é de cerca de 13.000 unidades (Martins, 2000). A maioria delas está distribuída na Europa, América do Norte e Japão.

As primeiras discussões no país sobre o assunto datam do início do século passado, com a construção da primeira escada de peixes no país, localizada na barragem de Salto Grande (1906) no rio Atibaia e em (1911) na barragem da Usina Hidroelétrica Itaipava, no rio Pardo, município de Santa Rosa do Viterbo, SP. Seguindo esse exemplo, outras estruturas para possibilitar a transposição das barragens na migração para montante pelos peixes de piracema foram construídas.

Mais recentemente, alguns mecanismos para transposição para montante vêm sendo instalados no país, impulsionados pela edição de leis estaduais que visam atenuar os impactos dos barramentos sobre os peixes de piracema, espécies mais significativamente afetadas. A Lei Estadual 12.488, de 09/04/1997 (Minas Gerais, 1997), torna obrigatória a construção de mecanismos de transposição de peixes em barragem a ser edificada e existentes em curso d'água no domínio do Estado de Minas Gerais, exceto quando em virtude das características do projeto a medida for considerada ineficaz. Além da Lei 12.488, o artigo 20º do Decreto 38.744, de 09/04/1997, determina que para o licenciamento ambiental de novas usinas hidrelétricas, é exigida a construção destes mecanismos. Projetos de lei desta natureza também vêm sendo discutidos em outros estados brasileiros (Magalhães *et al.*, 2004).

O sucesso na transposição dos peixes para regiões à jusante nos cursos dos rios está invariavelmente seguido da necessidade de se preverem as condições do movimento de descida em diferentes estágios do ciclo de vida de algumas espécies (Odeh, 1999).

Os problemas relacionados com a migração para jusante ou descida dos peixes (conhecida como “*downstream migration*”) vêm sendo alvo de muitos estudos na América do Norte, Europa e Japão (Ferguson, 1998, 2005; Cada, 2001). Alguns sistemas para promover a passagem e proteção da ictiofauna, junto às estruturas de uma central hidrelétrica, envolvem intervenções e a implantação de mecanismos, e ocasionalmente a utilização de estímulos sensoriais tais como luz, som, turbulência, ou campos elétricos capazes de influenciar o posicionamento dos peixes em relação às estruturas da usina (Schilt, 2007). Muitos dispositivos vêm sendo desenvolvidos e implantados para permitirem este deslocamento (Odeh e Orvis, 1998; Ferguson *et al.*, 1998), dentre os quais podemos citar: anteparos direcionais nas tomadas d' água para a proteção e condução até canais em *bypass*, vertedores de superfície, barreiras basculantes (*louvers*) e os dispositivos conhecidos como barreiras comportamentais (emissão de luz, som, cortinas de bolhas, barreiras elétricas, etc), que são utilizadas individualmente ou combinados para impedir a entrada dos peixes em turbinas, assim como para conduzi-los até os dispositivos para descida (Odeh e Orvis, 1998; Larinier, 2002; Clay, 1995).

Ao contrário da crescente tendência existente no hemisfério Norte de garantir o retorno dos peixes para os segmentos à jusante, nenhum tipo de obra de transposição que assegure este movimento foi construído no Brasil. Isto se deve, em parte, ao foco dado às ações de manejo

aos trechos represados, à maior visibilidade dada pelo acúmulo de peixes à jusante e à crença de que os peixes poderiam descer pelo mesmo dispositivo usado para subir.

Alguns resultados positivos têm sido verificados com a implantação de MTP (Moffitt *et al.*, 1982; Moring, 1993; Clay, 1994), em centrais hidrelétricas. A eficiência destes dispositivos reside, fundamentalmente, no conhecimento das características biológicas das espécies que o utilizarão. Tal conhecimento pode ser denominado de base biológica dos mecanismos de transposição e inclui diversos aspectos, tais como: (i) habilidades natatórias dos peixes, em termos de velocidades mínimas de atração e velocidades máximas capazes de serem superadas; (ii) padrões migratórios, compreendendo a distribuição temporal e espacial das diferentes espécies; (iii) comportamento no canal de fuga, particularmente a distribuição das diferentes espécies em função de características do escoamento (i.e. profundidade, velocidade, nível de turbulência, qualidade da água, temperatura, oxigênio dissolvido, luminosidade, dentre outros); e (iv) a capacidade dos peixes de localizarem o “caminho de volta” durante a migração para jusante.

Durante seu deslocamento para jusante em relação à barragem os peixes se deparam com três alternativas para sua passagem, quais sejam: 1) passar pelas turbinas, 2) transpor a barragem pelo sistema de descarga dos vertedouros ou, 3) serem desviados da entrada das turbinas e redirecionados para os sistemas de coletas e condução ou descarga no canal de fuga (quando existirem) (Carlson e Duncan, 2003).

Ainda relacionado à descida de peixes, recentes estudos vêm sendo realizados com o objetivo de descrever o comportamento de algumas espécies frente a mudanças bruscas de pressão. Como resultado destes estudos, pode ser citado o projeto das chamadas “*fish-friendly hydraulic turbine systems*” – turbinas amigáveis (Cada, 1997). São turbinas, geralmente axiais, cujas pás e outros componentes são adaptados para permitir a passagem dos peixes, com baixos índices de mortalidade (Therrien e Bourgeois, 2000).

O projeto de “turbinas amigáveis” tem suscitado recentes pesquisas para o levantamento dos efeitos, por exemplo, da variação de pressão no comportamento de espécies de peixes, principalmente na América do Norte. Peixes têm sido submetidos a diferentes cenários de variações de pressão durante as pesquisas conduzidas pelos cientistas do *Pacific Northwest National Laboratory*. (Abernethy e Cada, 2002; Carlson e Abernethy, 2005)

Vários tipos de mecanismos de transposição para peixes têm se desenvolvido ao longo das últimas centenas de anos, sendo este desenvolvimento mais rápido nos últimos 50 anos (Clay, 1995). Entretanto, mesmo neste último período, este aperfeiçoamento tem sido lento devido à carência de dados relativos às necessidades e características das espécies de peixes envolvidas.

A mortalidade dos peixes durante seu processo de migração para jusante pode ser reduzida através da construção de estruturas específicas de transposição, ou através de modificações nas estruturas da barragem de modo que seja causado o menor número possível de danos aos peixes. Uma das passagens de peixes para jusante mais comuns na América do Norte, do tipo *bypass*, é constituído por um anteparo localizado na parte superior da tomada d'água para as turbinas, ligado a uma tubulação ou mecanismo de desvio (Ferguson *et al.*, 1998; Isab, 1998). Este tipo de mecanismo tem sido utilizado geralmente para permitir a descida de jovens salmões, em seu processo de migração em direção ao mar. Com o aumento de pressões ao longo da tomada d'água, sabe-se que indivíduos desta espécie se orientam e nadam em direção à superfície. Assim, um anteparo posicionado junto à parede superior da tomada d'água é capaz de interceptar e desviar os peixes que foram aduzidos em direção às turbinas, direcionando-os com segurança para áreas à jusante.

2.4.2. A passagem de peixes pelo sistema gerador

A ausência de mecanismos eficientes para a transposição de peixes de montante para jusante das barragens conduz a duas outras principais rotas alternativas de passagens dos peixes: pelo sistema extravasor ou pelas turbinas. A passagem por turbinas vem sendo estudada como a rota de passagem dos peixes que mais contribui para o impacto na ictiofauna.

Ruggles (1980) *apud* Mathers *et al.* (2002) identificou quatro categorias de causas para mortalidade e lesões nos peixes que passam por turbinas:

- (i) danos causados por choques mecânicos contra componentes fixos e móveis das turbinas;
- (ii) danos causados pela exposição a gradientes de pressão no interior da turbina;
- (iii) danos causados por efeitos cisalhantes em regiões de extrema turbulência;

- (iv) danos causados pela ocorrência do fenômeno de cavitação devido à existência de regiões com sub-pressão.

Numerosos experimentos vêm sendo conduzidos em vários países (EUA, Canadá, Suécia, Países Baixos, Alemanha e França), principalmente com salmões juvenis e, menos freqüentemente, com espécies da família clupeidae, enguias e outras espécies para determinação da taxa de mortalidade pela passagem pelos principais tipos de turbina (Bell, 1981; Monten, 1985; EPRI, 1987, 1992; Larinier, 2008).

2.4.3. A mudança do projeto nas máquinas hidráulicas

Gerenciadores e investidores do setor hidrelétrico têm buscado, pelo menos em alguns países, otimizar a sobrevivência dos peixes, que passam pelas barragens, através de modificações no projeto e operação das estruturas e mecanismos das usinas. Para o desenvolvimento de barragens conhecidas como mais “amigas dos peixes”, do inglês “*fish friendly*”, projetistas devem entender as situações de perigo que o peixe possa encontrar durante sua transposição. O levantamento destas informações requer a caracterização das condições que o peixe experimenta durante sua passagem por ambientes hidraulicamente complexos e identificar a localização e operação onde tais condições são tão severas a ponto de causar danos aos peixes.

2.5. Variáveis hidráulicas envolvidas - impactos da heterogeneidade hidrodinâmica do escoamento

Os diferentes sistemas que compõem uma central hidrelétrica condicionam a existência de regiões de escoamento com características hidráulicas distintas. O estudo do comportamento das espécies de peixe frente a estas condições hidráulicas e a determinação de parâmetros biológicos limitantes têm-se mostrado como uma ferramenta indispensável para o projeto e melhorias em sistemas que permitem a passagem de peixes.

Os padrões comportamentais dos peixes devem ser considerados no desenvolvimento e aplicação de técnicas que visam à redução dos impactos causados pelos empreendimentos hidroelétricos. A maioria das pesquisas já realizadas focou na capacidade e atividades

natatórias dos peixes, e nos impactos atrativos ou repulsivos a partir de estímulos visuais, sonoros, elétricos e hidrodinâmicos (Pavlov, 1989; Odeh e Orvis, 1998; Larinier, 2002; Pavlov *et al.*, 2008).

A partir do momento que o peixe entra pela tomada d água de uma usina e é levado a passar por sua turbina, este indivíduo é submetido a mudanças bruscas de seções geométricas e de características do escoamento. Acredita-se que o peixe possa sofrer diferentes lesões em determinadas regiões ao longo deste trajeto (Odeh, 1999; Cada, 1990; USACE, 1995; Cada *et al.*, 1997). Estas lesões foram identificadas como resultados de mudanças extremas e bruscas de pressões, impactos e esmagamentos nas pás, desorientação devido à grande turbulência do canal de fuga e conseqüentemente a suscetibilidade à ação de predadores, que são as principais causas das mortes e danos nos peixes que passam por turbinas (Cada, 1990; USACE 1995; Cada *et al.*, 1997).

- Mudanças bruscas e extremas de pressão – (a pressão no interior das turbinas pode aumentar consideravelmente e em poucos segundos reduzir drasticamente até mesmo para pressões negativas);
- Cavitação (condições de pressões extremamente baixas induzem a formação de bolhas de gás ou vapor que quando implodem geram colapsos violentos);
- Tensões cisalhantes (forças aplicadas paralelamente à superfície dos peixes em decorrência da diferença de velocidade entre camadas do escoamento);
- Turbulência (movimentos irregulares do escoamento podendo gerar tensões localizadas ou desorientação, quando dada em grande escala);
- Choques mecânicos (colisão com componentes da turbina tais como pás do rotor, aletas (fixas e móveis) e tubo de sucção);
- Esmagamento (efeito de espremer nos estreitos espaçamentos entre as partes fixas e móveis).

A FIGURA 2.2 mostra as sete regiões que Cada (1997) identificou como principais fontes causadoras de danos por passagem por turbinas, correlacionando-as com as condições hidráulicas existentes.

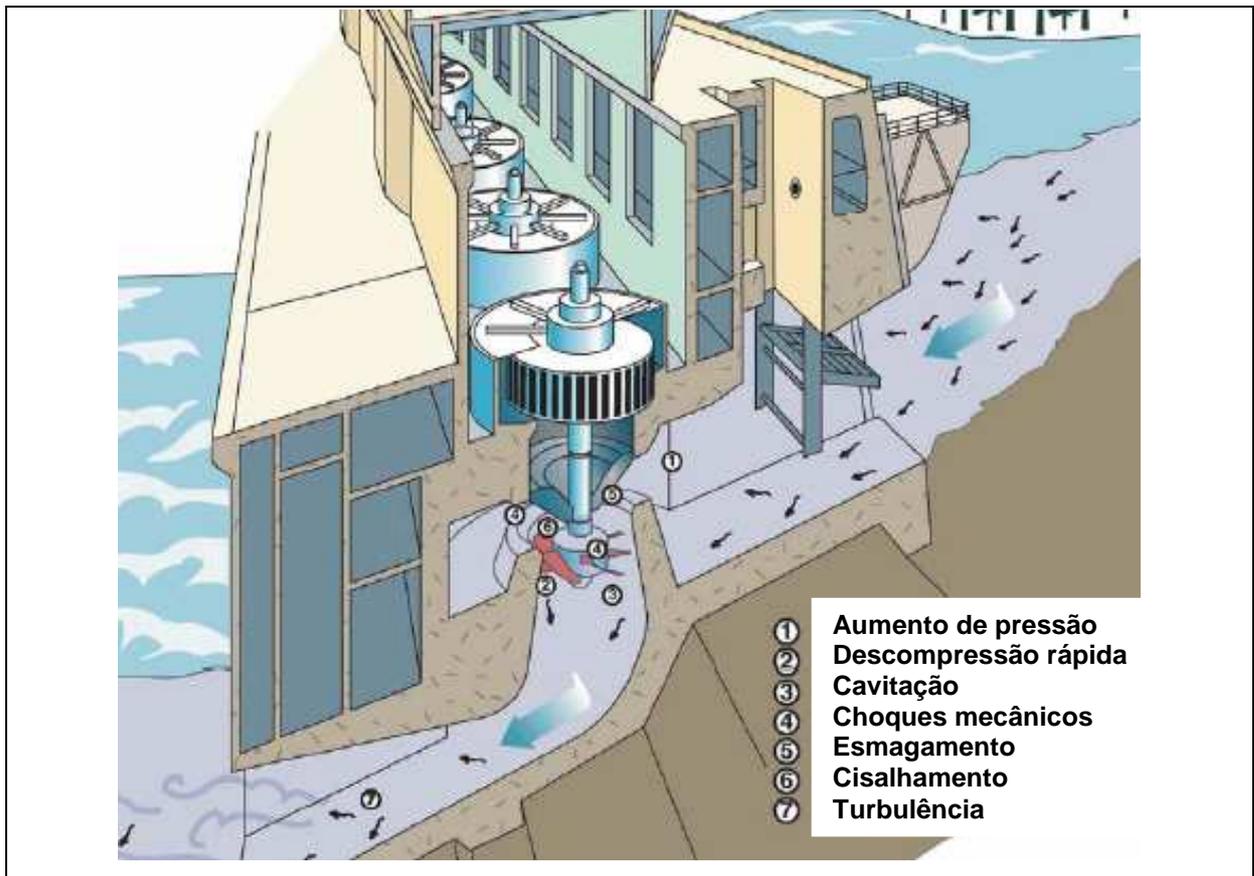


FIGURA 2.2 – Regiões causadoras de danos na ictiofauna.

FONTE – Adaptado de Cada *et al.*,1997.

Todas estas condições adversas podem causar lesões físicas, severas o suficiente a ponto de serem letais para os peixes, como: descamação; perda da camada mucosa protetora; abertura excessiva do opérculo (que cobre as brânquias); decapitação; hematomas; rompimento de bexiga natatória; hemorragias e outros danos internos.

Segundo Cada (2001), todas as situações de estresse descritas acima podem ser suficientemente severas a ponto de levar a morte de peixes (mortalidade direta), tanto individualmente, quanto combinadas entre si. Se tais situações adversas não são imediatamente letais, os peixes podem, por outro lado, ficar desorientados e conseqüentemente mais susceptíveis à predação no canal de fuga à jusante da barragem, ou ainda enfraquecidos e, portanto, predispostos a doenças (mortes indiretas).

2.5.1. Danos indiretos

O interesse na questão da desorientação e aumento, pelo menos temporário da susceptibilidade à predação, é particularmente relevante para a passagem pelos trechos à

jusante do rotor das turbinas, ou seja, na saída do tubo de sucção e canal de fuga onde ocorrem altos níveis de turbulência de grande escala (Carlson, 2001; Deng *et al.*, 2005). As mortes indiretas causadas pela passagem dos peixes pelas turbinas e por regiões adjacentes ainda não têm sido rigorosamente estudadas em campo, assim pouco se sabe se a mortandade indireta é realmente um fator significativo.

Informações individualizadas das respostas comportamentais nem sempre são suficientes para desenvolver soluções mais eficientes no gerenciamento e redução da mortalidade dos peixes junto às usinas. Assim, tornam-se necessárias técnicas que envolvem entradas (*inputs*) biológicas e um conhecimento mais profundo do comportamento dos peixes em um contexto ecológico mais amplo (Pavlov, 1994; Larinier *et al.*, 2002; Haro, 2006; Wiesner *et al.*, 2006).

Além da passagem pelas unidades geradoras, outras situações hidráulicas encontradas junto às centrais hidrelétricas também interferem no deslocamento e conseqüente eficiência de utilização dos mecanismos para a transposição de peixes.

A seguir será apresentada uma revisão dos estudos que vêm sendo realizados para o levantamento de parâmetros biológicos de algumas espécies de peixes submetidas às principais condições hidráulicas adversas encontradas junto às estruturas e sistemas das usinas hidrelétricas. Cabe ressaltar que a maioria dos estudos já realizados tem determinado as condições para a mortandade direta e muito menos tem sido estudado sobre os efeitos subletais da mortandade indireta.

2.5.2. Aumento da pressão e descompressão rápida

Nos cursos de rios, em condições naturais, sem a presença de barramentos, peixes são geralmente submetidos a pressões próximas à atmosfera na superfície, chegando, a algumas atmosferas de pressão no fundo, sendo esse acréscimo de profundidade e conseqüente pressão, administrado pelos peixes conforme suas características e necessidades.

Os peixes são mais densos do que a água em que vivem e apesar de possuírem alguns sistemas para compensar esta diferença eles afundam (Alexander, 1993). A massa específica dos tecidos de peixe teleósteos de água doce é cerca de 1,05 a 1,09 g/cm³, sem utilizar nenhum sistema compensatório de flutuação. As adaptações para a flutuação, no sentido mais

amplo de manter o posicionamento vertical, incluem o enchimento e esvaziamento de gás nas bexigas natatórias, forças hidrodinâmicas resultantes da natação e, em alguns casos, a manutenção de gorduras e óleos em determinados órgãos (fígado, por exemplo). A massa específica de muitos peixes pode ser reduzida para até 1% da massa específica da água em virtude destas adaptações. Devido à diferença entre a massa específica dos tecidos que compõe o organismo dos peixes, o centro de massa do corpo do peixe é deslocado em relação ao seu centro de flutuação. O centro de flutuação de peixes, que apresentam bexiga natatória, geralmente está posicionado um pouco abaixo do seu centro de massa, tornando seu equilíbrio instável, o que justifica o peixe ficar de barriga para cima quando morre ou quando é imobilizado (comatose) (Coutant e Whitney, 2000).

A maioria dos peixes ósseos tem, sob a coluna vertebral, uma bexiga natatória, também chamada de bexiga de ar. Este órgão especial assegura a flutuabilidade do peixe e possibilita o animal permanecer na profundidade desejada através da absorção e secreção de gases. É semelhante a um pulmão nos peixes pulmonados. Outros peixes ainda, dentre estes vários bagres, também utilizam a bexiga natatória para emitir sons (Evans, 1993; Moyle e Cech Jr., 2000). A bexiga natatória em peixes de água doce ocupa em média 7% do seu volume total, expandindo quando o peixe nada em direção a superfície, onde a pressão é menor, e comprimindo quando os peixes nadam para o fundo. De acordo com a Lei de Boyle (o volume do gás é inversamente proporcional à pressão aplicada sobre ele a uma mesma temperatura, o produto pressão (p) x volume(V) é constante, isto é, uma alteração na pressão provoca uma alteração no volume de maneira que o produto (p x V) continue constante) para volumes de gases sob pressão, o volume da bexiga natatória deve reduzir em 50% a cada atmosfera de pressão que o peixe adquire ao descer (Coutant e Whitney, 1998, 2000). O processo de equilíbrio da flutuação em determinadas espécies pode ser bastante lento e pode acontecer na taxa de alguns metros de profundidade por hora. Segundo Alexander (1993), por exemplo, para uma espécie de perciforme da Europa a taxa mais rápida obtida é de aproximadamente 2,5 metros por hora. Esta velocidade de ajuste pode ser extremamente lenta quando comparada ao tempo de passagem do escoamento por turbinas. Considerando os peixes que possuem sistema de ajuste de flutuação por bexiga natatória, sabe-se que a reação às mudanças bruscas de pressão (sob as quais os peixes são submetidos, por exemplo, quando da passagem por turbinas) é afetada pelo fato de serem fisóstomos ou fisóclistos (Moyle e Cech Jr., 2000). Os chamados peixes fisóstomos possuem um ducto pneumático que interliga a bexiga natatória ao dorso caudal do esôfago (Moyle e Cech Jr., 2000; Abernethy *et al.*, 2001), conforme mostrado na FIGURA 2.3. O ar pode rapidamente entrar e sair da bexiga natatória

através da boca pelo ducto pneumático, assim a variação da pressão da água pode ser equilibrada geralmente em poucos segundos (Cada, 1997). Como regra geral os fisóstomos são peixes com nadadeiras de raios moles “*soft-rayed*”, como salmões e trutas. Por outro lado os fisóclistos não possuem uma conexão direta entre a bexiga natatória e o esôfago. Nestes peixes, o conteúdo e a pressão do interior da bexiga natatória deve ser equilibrada com o ambiente através de difusão pelo sistema circulatório. Este processo de equilíbrio é estimado em algumas horas. Podemos citar entre os fisóclistos muitos dos peixes com nadadeiras apresentando raios modificados em espinhos “*spiny-rayed*”, como percas e outros perciformes (Moyle e Cech Jr, 2000). Fisóclistos, aclimatados próximos à superfície, quando são submetidos às condições do interior das turbinas, não são capazes de ajustar o volume da bexiga natatória suficientemente rápido para compensar a variação de pressão, assim a bexiga natatória será comprimida e estes peixes se tornam mais densos à medida que se aumenta a pressão. Em situações opostas, em regiões de pressões menores, à jusante do rotor, a bexiga natatória se expande rapidamente em níveis propícios ao rompimento (Odeh, 1999).

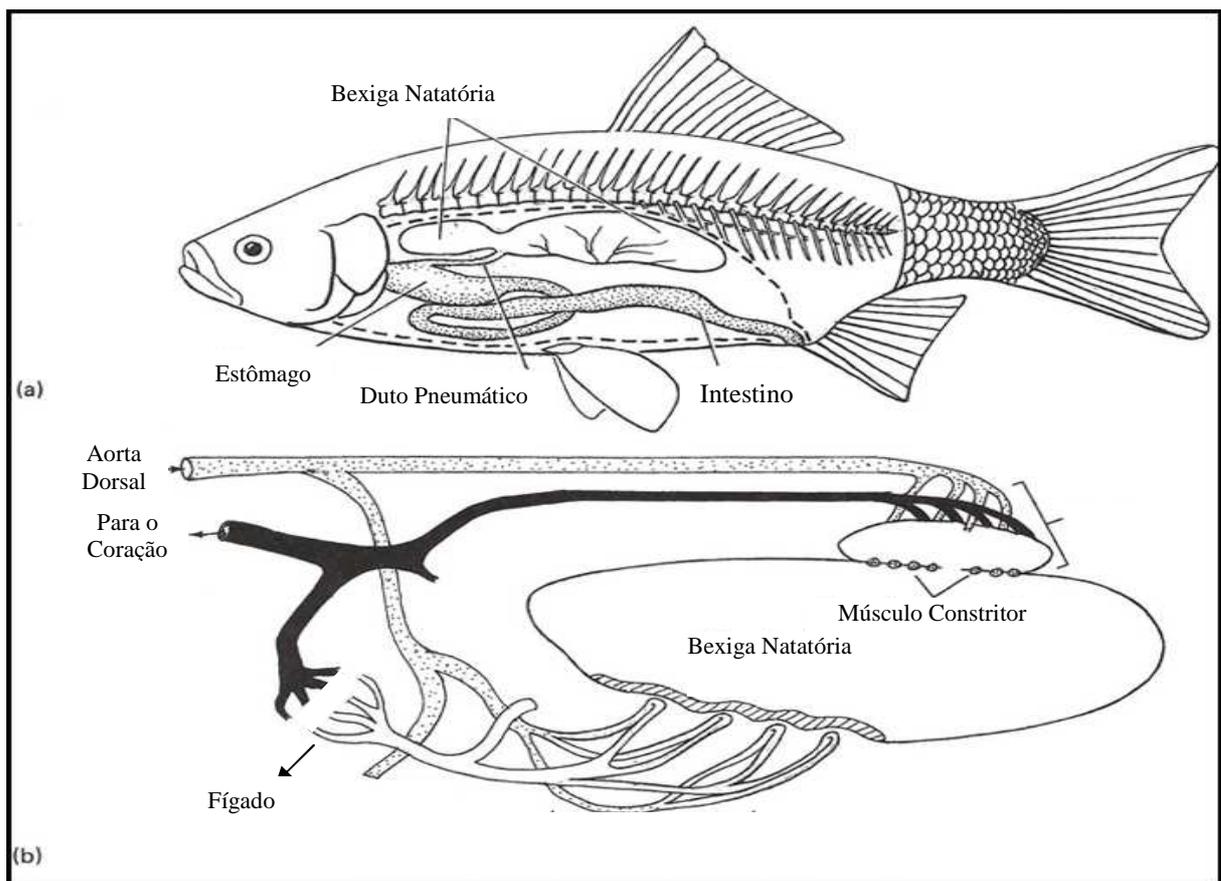


FIGURA 2.3 – Bexiga natatória: (a) um peixe fisóstomo com bexiga natatória dorsal logo abaixo da coluna vertebral conectada ao sistema digestivo pelo ducto pneumático; (b) conexão vascular da bexiga natatória de um fisóclisto que não é conectada ao sistema digestivo.

FONTE - <http://www.itresourcing.com.au/aquaculture/species/fish/fish.htm>

Os peixes fisóstomos possuem um maior controle do volume de ar no interior de suas bexigas do que os fisóclistos. Se um peixe fisóstomo aclimatado a águas mais profundas é trazido próximo à superfície, sua bexiga natatória irá se expandir devido à redução da pressão. O excesso de ar pode ser expulso através do ducto pneumático se a velocidade de ascensão for suficientemente baixa (Cada *et al.*, 1997).

Entretanto, como afirma Abernethy *et al.* (2001), mesmo os peixes fisóstomos podem não ser capazes de aliviar o ar em excesso devido à diminuição brusca de pressão (geralmente menores do que 1 segundo) encontradas quanto da passagem pela turbina e saída pelo tubo de sucção.

Tsvetkov *et al.* (1972) *apud* Cada (1997) realizaram testes de compressão e descompressão com várias espécies de peixes. Em seus experimentos os peixes eram aclimatados a altas pressões antes de sofrerem descompressão rápida até a pressão atmosférica (taxa de descompressão de cerca de 60,8 m.c.a./s (608 kPa/s)). Esta técnica foi adotada para representar a descompressão em peixes que já estavam sob altas pressões antes de passarem pelo sistema das turbinas. Ele verificou que as espécies na condição fisóstoma sobreviveram bem mais do que as espécies na condição fisóclistas, entretanto mesmo as espécies fisóstomas testadas podem morrer quando submetidas a uma taxa de descompressão maior do que 9,1 m.c.a./s (91 kPa/s).

Os danos causados pela variação de pressão que os peixes sofrem estão diretamente ligados à pressão na qual o animal se encontrava antes de passar pela turbina, definida como a **pressão de aclimação**. Esta diferença entre as pressões iniciais de aclimação está relacionada à profundidade e pode variar geralmente entre 5 metros em empreendimentos de baixa queda até mais de 50 metros em centrais com grandes desníveis. Além da altura do barramento, devem-se considerar os hábitos das espécies locais com relação a sua profundidade preferencial.

Acredita-se que os peixes sejam muito mais sensíveis à redução brusca de pressão do que ao aumento, e a mortalidade decorrente dos efeitos de pressão, geralmente está relacionada aos danos na bexiga natatória por descompressão (Tsvetkov *et al.* (1972) *apud* Cada, 1990; Cada *et al.*, 1997).

Jones (1951) testou indivíduos de uma espécie de perciforme (*yellow perch*) com cerca de 10 centímetros de comprimento. Segundo o autor, os peixes testados tiveram suas bexigas natatórias estouradas quando submetidos a uma descompressão brusca de pressão para valores correspondentes a 40% da pressão de aclimação.

Feather e Knable (1983) submeteram uma determinada espécie de peixe ("*largemouth bass*") a pressões absolutas de aclimação (19,1; 28,0 e 36,9 m.c.a.), reduzindo-as para condições de pressão atmosférica local 10,1 m.c.a. (101 kPa) em segundos. A taxa de mortalidade obtida mostrou-se diretamente relacionada à magnitude da descompressão variando entre 25% para a pressão de aclimação de 19,1 m.c.a. (191 kPa) até 46% de mortalidade com a pressão de aclimação de 36,9 m.c.a. (369 kPa). As mortes por descompressão ocorreram dentro de uma hora após os testes para pressões de aclimação maiores e, em até 5 dias, com a pressão de 19,1 m.c.a. (191 kPa). Os autores atribuem as mortes em até 5 dias principalmente devido à dificuldade respiratória e ao estresse de permanecer boiando na superfície devido à expansão da bexiga natatória. Já a descompressão após o aclimação a 28,0 m.c.a. (280 kPa) e 36,8 m.c.a. (368 kPa) causou graves hemorragias e formação de bolhas principalmente na região do coração e vasos sanguíneos, brânquias e no cérebro.

A TABELA 2.1 apresenta um resumo dos dados compilados por Cada *et al.* (1997) referentes aos índices de mortalidade obtidos a partir de testes de descompressão em laboratório realizados com espécies de peixes do hemisfério norte. Este resumo apresenta as pressões de aclimação (Pa) e as pressões mínimas de teste (Pe) assim como a taxa de redução da pressão (Pe/Pa). Os dados foram selecionados utilizando os seguintes critérios: 1) peixes foram condicionados a uma determinada pressão (geralmente à pressão atmosférica) em tempo suficiente para se aclimatarem; 2) a redução entre a pressão de aclimação e a pressão de teste foi rápida, isto é, não maior que poucos segundos (para a simulação da variação de pressão no interior da turbina).

Muitos dos testes em laboratórios realizados até o final da década de 90, apesar de pouco documentados e muitas vezes com uma amostra pequena de peixes, indicam uma considerável variação na resposta do peixe para diferentes taxas de redução de pressão. Entretanto, de maneira geral, conforme apresentado na TABELA 2.1, pode-se perceber maior mortalidade para maiores reduções percentuais de pressão em relação à pressão de aclimação.

TABELA 2.1– Dados compilados sobre o índice de mortalidade de peixes em testes de decompressão realizados em laboratório para espécies do hemisfério norte.

Teste	Espécie	Pressão de Aclimação P _a (kPa)	Pressão mínima de teste P _e (kPa)	P _e / P _a	Mortalidade (%)	Fonte
1	<i>Sockeye salmon</i>	101	67	0,66	0	Harvey (1963)
2	<i>Sockeye salmon</i>	343	101	0,29	0,5	Harvey (1963)
3	<i>Sockeye salmon</i>	101	67	0,66	2	Harvey (1963)
4	<i>Sockeye salmon</i>	205	67	0,33	21	Harvey (1963)
5	Perch	303	101	0,33	70	Tsvetkov <i>et al.</i> (1972)
6	<i>Largemouth bass</i>	101	101	1,00	0	Feathers and Knable (1983)
7	<i>Largemouth bass</i>	191	101	0,53	25	Feathers and Knable (1983)
8	<i>Largemouth bass</i>	280	101	0,36	41,7	Feathers and Knable (1983)
9	<i>Largemouth bass</i>	369	101	0,27	45,8	Feathers and Knable (1983)
10	<i>Bluegill sunfish</i>	101	17	0,17	33	Hogan (1941)
11	<i>Bluegill sunfish</i>	101	17	0,17	50	Hogan (1941)
12	<i>Crappie</i>	101	41	0,40	100	Hogan (1941)
13	<i>Crappie</i>	101	17	0,17	50	Hogan (1941)
14	<i>Largemouth bass</i>	101	17	0,17	80	Hogan (1941)
15	<i>Largemouth bass</i>	101	17	0,17	100	Hogan (1941)
16	<i>Largemouth bass</i>	101	17	0,17	50	Hogan (1941)
17	<i>Atlantic salmon, Brown trout, Rainbow trout</i>	101	15	0,15	0	Turnpenny <i>et al.</i> (1992)
18	<i>Brown trout</i>	343	30	0,09	10	Turnpenny <i>et al.</i> (1992)
19	<i>Rainbow trout</i>	343	30	0,09	0	Turnpenny <i>et al.</i> (1992)
20	<i>Herring</i>	343	30	0,09	4	Turnpenny <i>et al.</i> (1992)
21	<i>coho salmon</i>	101	7	0,07	0	Muir (1959)
22	<i>coho salmon</i>	101	7	0,07	10	Muir (1959)

FONTE – Adaptado de Cada *et al.* (1997)

Como parâmetro para projetos, Cada *et al.* (1997) observaram que a ocorrência de maior mortalidade está associada à redução da pressão de decompressão para valores percentuais maiores que 60% ou seja, para índice de variação (Pe/Pa) menores que 0,4 conforme mostrado na FIGURA 2.4. Os estudos realizados por USACE (1991) sugerem que este índice

seja de 0,3, ou seja, menos restritivo. Cada *et al.* (1997) ressaltam que este critério de 30% talvez seja suficiente para proteger espécies salmonídeas e outras que se adaptam à maior profundidade, sendo capazes de liberar gás da bexiga natatória enquanto descem em direção à entrada da tomada d'água, entretanto talvez não seja suficiente para proteger outras espécies de peixes fisóclistos.

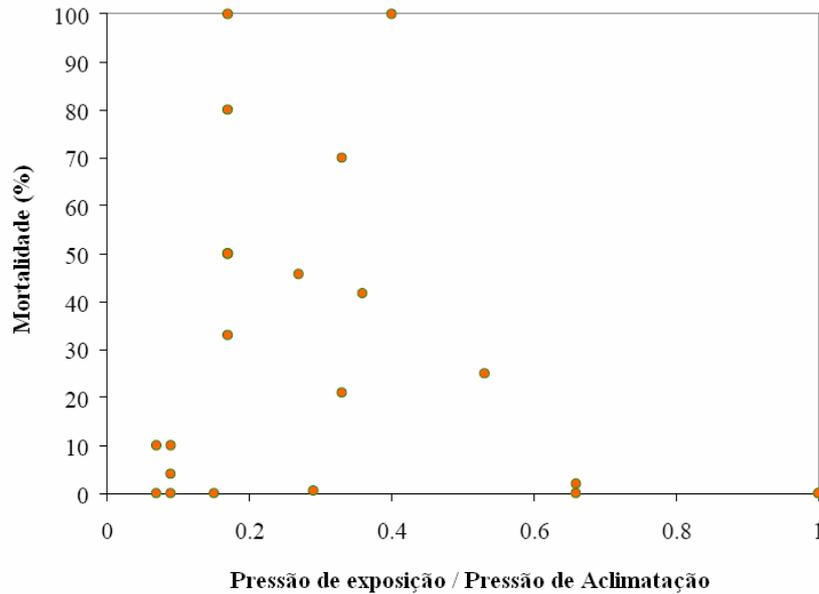


FIGURA 2.4 – Mortalidade em decorrência da redução brusca de pressão em testes realizados em laboratório.
FONTE – Adaptado de Cada *et al.* (1997)

A presença de barramentos hidroenergéticos torna as condições ambientais para os peixes muito adversas. O grande volume de água que entra pela tomada d'água pode fazer com que, dependendo do arranjo da usina, os peixes sejam atraídos ou arrastados a entrarem na casa de máquinas, podendo sofrer muitos danos quando passam pelas turbinas. Dentre estes danos se destaca a brusca variação de pressão, principalmente no interior da máquina.

Bell (1991) *apud* Abernethy, Amidan e Cada (2001), calculou a pressão junto às pás de turbinas Francis nos empreendimentos hidroenergéticos de Lequille e Shasta (rio Michigan, EUA). Constatou-se que da entrada da turbina até a saída (correspondente ao início do tubo de sucção) a pressão decresce abruptamente de 582 até 56 kPa em Lequille e de 736 até 95 kPa em Shasta.

A partir de 1993, pesquisas apoiadas por órgãos e associações do governo americano (DOE, EPRI e *Research and Development Committee of the National Hydropower Association* -

NHA), em parceria com laboratórios e fabricantes de componentes para centrais hidrelétricas, vêm sendo conduzidas para a determinação dos efeitos de pressão em espécies norte americanas envolvidas com a implantação e operação de centrais hidrelétricas.

Como exemplo de máxima variação de pressão que pode ocorrer durante a passagem por turbina, Becker *et al.* (2003) descreveram as condições hidrodinâmicas da pressão em uma turbina Kaplan instalada na Usina de McNary (rio Columbia – EUA). As pressões consideradas são em valores absolutos.

Considerou-se a possibilidade do peixe estar localizado em elevações próximas à entrada da tomada d'água e em seguida passar através da turbina pela parte de baixo das pás (menores pressões). Neste trajeto, o peixe estaria submetido a um histórico de pressão que inicia em cerca de 20,0 m.c.a. (200 kPa) próximo ao teto da estrutura da tomada d'água, aumenta para cerca de 34,0 m.c.a. (340 kPa), quando se aproxima do rotor e, subseqüentemente, reduz para 0,2 m.c.a. (2 kPa - pouco maior que zero atmosfera) no contato com as pás (*blade tip*). O valor de pressão de 2 m.c.a. (2 kPa) corresponde aproximadamente à pressão de vapor da água a 20°C (2,34 kPa), isto é, a pressão em que pode ocorrer o fenômeno da cavitação. A pressão de aproximadamente 2 kPa dura cerca de 0,25 segundo quando então retorna a condições próximas à pressão atmosférica no tubo de sucção e canal de fuga.

A FIGURA 2.5 apresenta em forma gráfica a simulação da variação de pressão pela passagem por uma turbina Kaplan durante os estudos conduzidos pelo PNNL (*Pacific Northwest National Laboratory*).

Os testes com peixes foram realizados a partir da variação da pressão em uma câmara hiperbárica, capaz de simular a seqüência de pressões as quais os peixes seriam submetidos (Abernethy *et al.*, 2001).

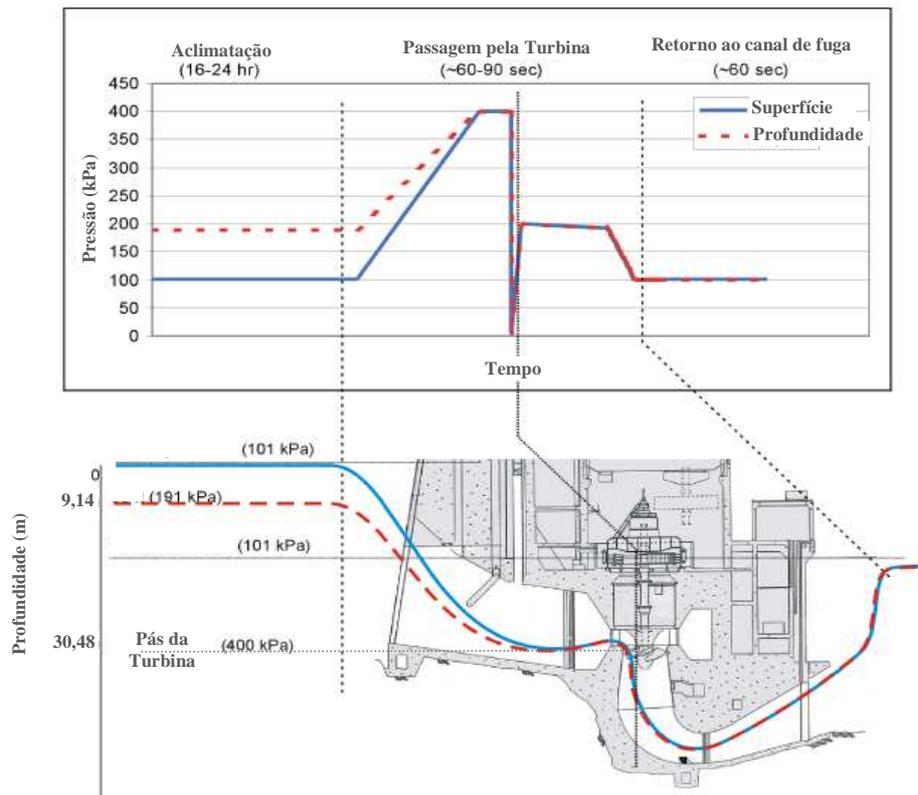


FIGURA 2.5 – Simulação de pressões críticas pela passagem de peixes por uma turbina Kaplan vertical da Usina de McNary – Início da trajetória a partir da superfície e a cerca de 9 metros de profundidade. FONTE – Abernethy *et al.* (2001).

Outros tipos de turbinas também vêm sendo estudados quanto à variação de pressão e os efeitos em peixes. Cada (1990) descreve a seqüência de variação de pressão típica de uma turbina do tipo bulbo horizontal. Este tipo de turbina é geralmente utilizada em empreendimentos de baixa queda. A pressão absoluta geralmente varia de 21,0 m.c.a. (210 kPa) até cerca de 8 m.c.a. (80 kPa). Nestes tipos de turbinas, peixes aclimatados na superfície (101 kPa) perceberão o dobro de pressão à jusante do rotor e, subsequentemente, uma redução instantânea de até 80% da pressão de aclimação num intervalo de tempo de menos de 15 segundos.

A FIGURA 2.6 apresenta o cenário de simulação de variações de pressões que foram modificadas para simular a passagem por uma turbina Bulbo horizontal também realizado pelo PNNL (Abernethy *et al.*, 2003). Duas trajetórias da passagem de peixe pela turbina Bulbo são mostradas: uma correspondente à chegada próxima à superfície (101 kPa) e a outra a uma profundidade de cerca de 9 metros (191 kPa).

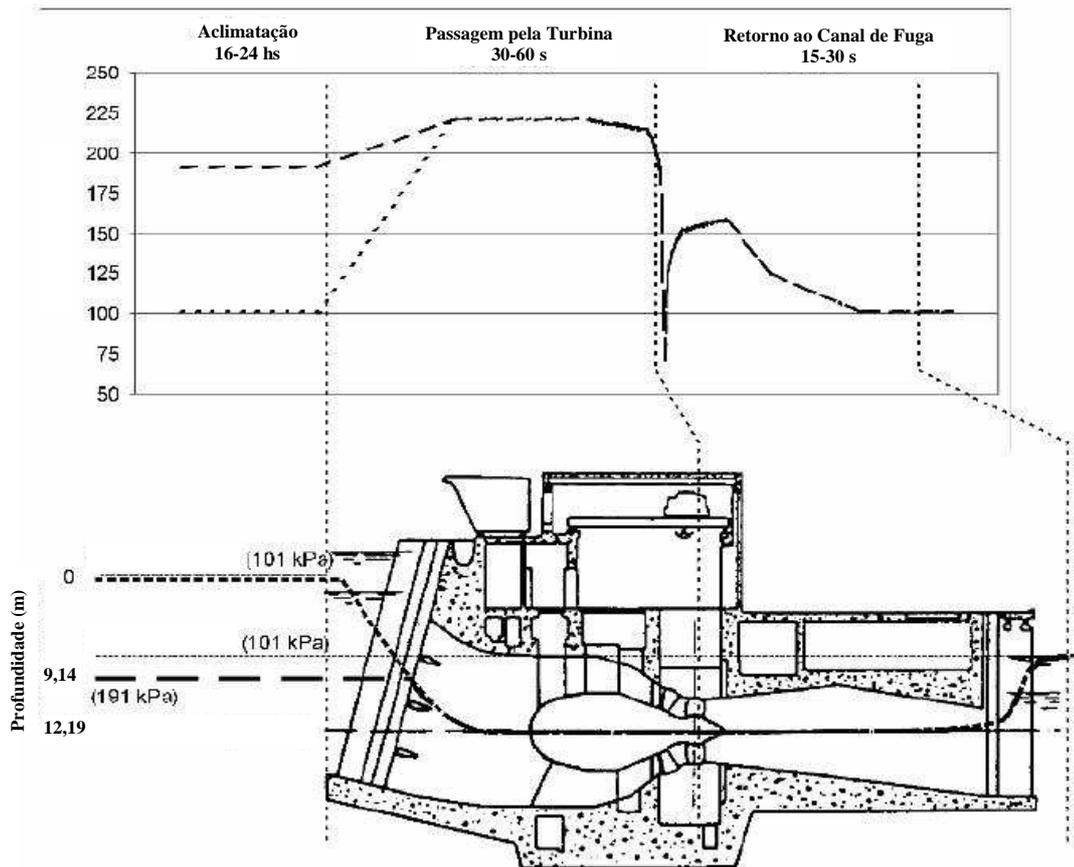


FIGURA 2.6 – Seqüência de pressão na trajetória do peixe que passa pela linha de centro de uma turbina tipo Bulbo horizontal após ter se aproximado da superfície da tomada d'água (101kPa) ou a uma profundidade de cerca de 9 metros (191kPa).

FONTE – Albernethy *et al.* (2003).

Para se quantificarem os danos diretos e indiretos oriundos da variação de pressão decorrentes dos sistemas das usinas e simuladas em laboratórios são necessárias observações sistemáticas das condições dos peixes antes e após os testes. Os métodos para avaliação dos efeitos da variação de pressões e outras variáveis hidráulicas serão apresentados no item 2.7.2. A FIGURA 2.7 mostra os efeitos imediatos e após 48 horas da variação brusca de pressão à qual peixes são submetidos em testes de passagens por turbinas.



FIGURA 2.7 – Visão externa da hemorragia em um dos peixes testados, observada imediatamente após (foto esquerda) a variação brusca de pressão conduzida nos testes e após 48 horas (foto direita)

FONTE - Albernethy *et al.* (2003).

2.5.3. A supersaturação de gases dissolvidos

A supersaturação de gases dissolvidos (SGD) é uma condição que pode ocorrer em muitos ambientes aquáticos. A SGD ocorre quando as pressões parciais dos gases atmosféricos, em uma determinada solução, excedem suas respectivas pressões no ar. A FIGURA 2.8 apresenta a relação entre a solubilidade e temperatura dos dois principais gases presentes na água. Quando a concentração de oxigênio e nitrogênio dissolvido estiver acima de sua linha de saturação, mostrada na FIGURA 2.8, estes estarão em estado de supersaturação. Na FIGURA 2.8 também é apresentada a pressão de vapor da água em função da temperatura. O vapor de água tem um importante papel nos níveis de gases dissolvidos e nos efeitos biológicos dos SGD. Entretanto, a condição de vapor de água é normalmente tratada como estando em estado saturado, em função das temperaturas comumente encontradas (Colt *et al.*, 1994). Isso é válido em climas temperados. Já nas condições de clima tropical, como no Brasil, esta observação não se aplica, pois os rios podem apresentar temperaturas mais altas (aproximadamente 27 graus).

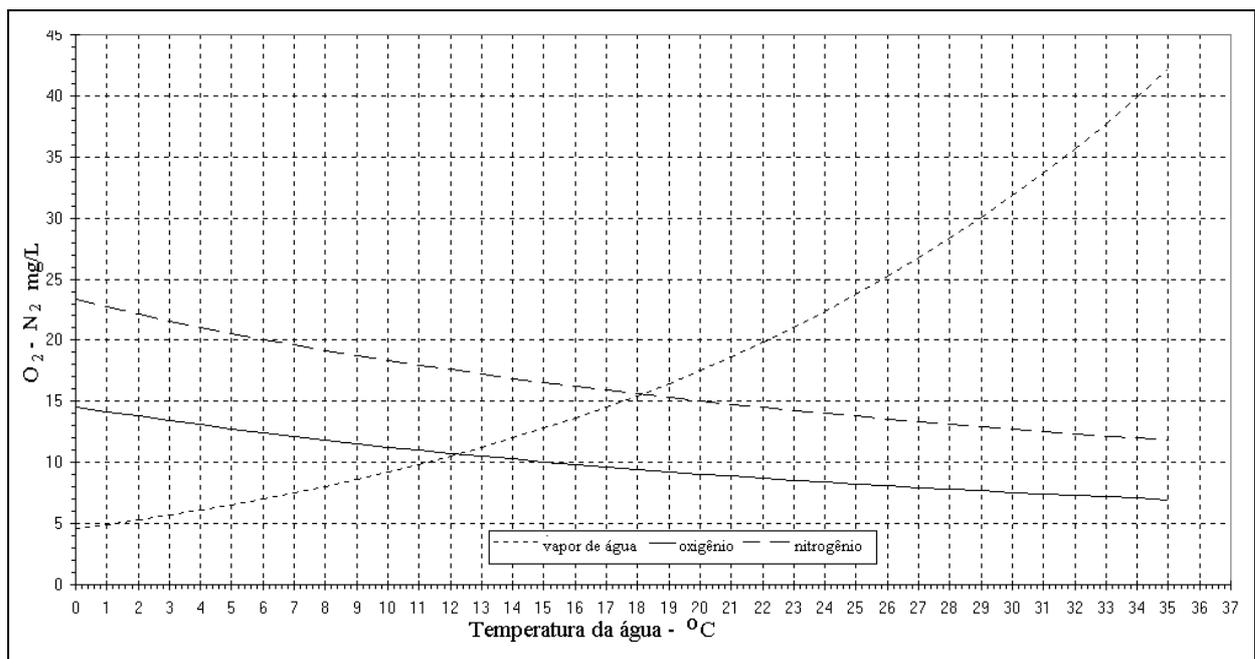


FIGURA 2.8 – Solubilidade do oxigênio e nitrogênio em água e pressão de vapor da água (pressão atmosférica 760 mmHg)

FONTE – Adaptado de Fidler e Miller (1994).

A porcentagem de oxigênio dissolvido em um sistema aquático pode ser determinada a partir da relação entre o oxigênio dissolvido e a concentração de saturação de oxigênio dissolvido a uma dada temperatura. Assim o índice OD representa a quantidade de oxigênio molecular (O_2) dissolvido na água e geralmente é expresso em miligrama por litro (mg/L) ou porcentagem de saturação em uma dada temperatura e pressão.

O oxigênio dissolvido é resultante do processo de dissolução/aeração das águas e como produto da reação de fotossíntese, variando em função da temperatura, salinidade da água e da pressão atmosférica.

Reduções significativas nos teores de OD podem ser provocadas por despejos de origem orgânica (e.g. esgotos e alguns efluentes industriais) e/ou em condições de temperaturas mais elevadas, reduzindo a solubilidade do oxigênio na água.

Os gases dissolvidos presentes na água, quando avaliados individualmente, podem estar supersaturados sem que causem efeitos indesejáveis nos organismos aquáticos. Entretanto, quando a soma das pressões parciais de todos os gases presentes excederem a pressão atmosférica existe a possibilidade de ocorrer o desenvolvimento de bolhas de gás na água e nos organismos vivos que nela habitam. Este fenômeno leva à ocorrência dos danos conhecidos como “trauma por bolhas de gás” ou do inglês “*gas bubble trauma – GBT*”. O “trauma por bolhas de gás” e suas conseqüências fisiológicas aos peixes serão melhor descritos no item 2.7 (Colt *et al.*, 1994; Field, 1992).

Desde os anos 1960, as ocorrências de altos índices de mortalidade de peixes à jusante dos empreendimentos hidrelétricos da bacia do rio Columbia nos EUA, em decorrência da formação de bolhas, têm sido monitorados e documentados em diversos artigos publicados (Colt *et al.*, 1994; Fuller *et al.*, 1998; Richmond *et al.*, 1998).

Desde então, estudos geralmente subsidiados por agências de proteção ambiental, órgãos estaduais, juntamente com companhias de energia, resultaram em documentos que estabeleceram critérios limites para a qualidade da água, principalmente para os rios Columbia e Snake nos EUA. A porcentagem máxima de saturação dos gases totais dissolvidos estabelecida para estes rios foi de 110% (Fuller *et al.*, 1998; USAGE, 1998).

Ryan e Dawley (1998) afirmam que a gravidade dos danos causados pela formação de bolhas nos peixes varia de acordo com a espécie, estágio de vida, tamanho, níveis totais de oxigênio dissolvido, duração à exposição, temperatura da água, condições fisiológicas gerais dos peixes e profundidade em que os peixes nadam.

A literatura existente sobre o tema apresenta uma variedade de métodos que vêm sido empregados para abordagem e cálculo das tensões dos gases dissolvidos.

A soma das pressões parciais de todos os gases dissolvidos é tradicionalmente denominada como pressão total de gases (PTG) (Colt *et al.*, 1994), enquanto que a diferença entre PTG e a pressão atmosférica é definido como delta P (ΔP). A pressão total de gases e o ΔP são geralmente definidos em mmHg ou às vezes, no nível do mar, em atmosferas locais. Muitos autores também definem PTG em porcentagem da pressão atmosférica local (PTG%). Colt *et al.* (1994) ressaltam que é mais apropriado descrever a pressão dos gases dissolvidos em delta P (ΔP) pois assim não é necessária a correção da supersaturação (PTG) ou da porcentagem de supersaturação (PTG%) em função da altitude e, conseqüentemente, da pressão barométrica.

Fontes para as condições de supersaturação de gases

A supersaturação de gases dissolvidos (SGD) pode ser a resultante de grande variedade de fontes tanto em conseqüência de atividades humanas, como naturais. A supersaturação pode estar associada às descargas de água aquecidas provenientes de sistema de refrigeração (por exemplo, usinas de geração nuclear e de combustíveis fósseis), a produção do oxigênio pelas plantas aquáticas (impulsionada por nutrientes associados com descargas industriais, municipais e agrícolas), o aquecimento de corpos d'água por incidência solar, a injeção do ar em sistemas de bombeamento, sistema de oxigenação em piscicultura, entre outros (Fidler e Miller, 1994).

As usinas hidrelétricas e outros barramentos são conhecidos por causar altos níveis de SGD (Jonhson *et al.*, 2007). A implantação destes empreendimentos pode ocasionar a existência de regiões com condições para a supersaturação de gases junto aos seus subsistemas. Nos subsistemas hidráulicos, a supersaturação pode ser causada pela descarga por vertedouros de superfície, descargas de fundo, comportas radiais, ou através de turbinas hidráulicas associada a determinadas condições de operação. Nas descargas por vertedouros livres ou por comportas radiais (difusores), pode ocorrer à entrada de ar durante a queda da massa líquida até a reentrância nas chamadas bacias de dissipação, que funcionam como colchões de água à jusante das barragens para dissipação de energia. Nestas regiões, sob elevadas condições de pressão hidrostática, o ar (sob a forma de bolhas) é forçado a se solubilizar. Em trechos do rio à jusante de barragens esta variação de pressão pode alcançar a faixa de 400 mm Hg (Ebel, 1975; White *et al.*, 1991; Fidler e Miller, 1994).

No caso da descarga por turbinas e saídas de fundo, o ar geralmente entra através de vórtices presentes na tomada d'água de turbinas e entradas de descargas (Johnson, 1988). Sob circunstâncias da alta pressão hidrostática junto à superfície das pás das turbinas ou na descarga de fundo, o ar incorporado à solução, tornando-a supersaturada. Nestas estruturas, as pressões hidrostáticas podem se aproximar às pressões de vapor da água e em seguida chegar a valores de ΔP maiores que 750 mm Hg. Estima-se que, em decorrência deste fenômeno, é possível que ocorra uma perda de até 15% de salmões juvenis devido à passagem pelas turbinas (BPA, 1993).

Outro aspecto a ser considerado é a manutenção de reservatório operando abaixo do nível normal. Esta condição de operação pode proporcionar a formação de vórtices e aumentar consideravelmente a entrada de ar e conseqüentemente a supersaturação.

Durante a operação das usinas hidrelétricas, ocasionalmente é necessária a injeção de ar nas turbinas para minimizar problemas relacionados à cavitação ou tensões mecânicas sob condições de carga desfavoráveis. Este ar, quando descartado em regiões mais profundas, à jusante das barragens, também pode contribuir para a ocorrência de altos níveis de SGD.

Dentre todas estas fontes possíveis de geração de SGD citadas, a descarga de água através de sistemas de vertimento em barragens tem recebido maior atenção na literatura (Ryan e Dawley, 1998; Richmond *et al.*, 1999). Quando a supersaturação de gases dissolvidos acontece junto às barragens, a razão entre as pressões parciais de supersaturação do nitrogênio e a pressão de saturação do oxigênio geralmente se assemelha à razão entre o nitrogênio e o oxigênio no ar (White *et al.*, 1991). Entretanto, isto pode variar dependendo da fonte de descarga de água. Por exemplo, a água que é descartada por um vertedouro de superfície, por possibilitar o vertimento da camada mais superficial do reservatório, pode conter uma alta concentração de algas e outras plantas, que associada ao aquecimento pelo incidência solar, torna os níveis de supersaturação parciais do oxigênio na água maiores que o de nitrogênio. Conforme afirma Fidler (1984), existe um potencial teórico de aumento do ΔP de cerca de 74 mmHg para cada metro submerso à jusante das barragens (na bacia de dissipação ou leito do rio) em decorrência do vertimento. A FIGURA 2.9 mostra o volume em mililitro adicional de ar por litro (ml/L) de água (isto é, volume acima do exigido para estabelecer a saturação atmosférica), necessário para produzir os níveis de ΔP indicados.

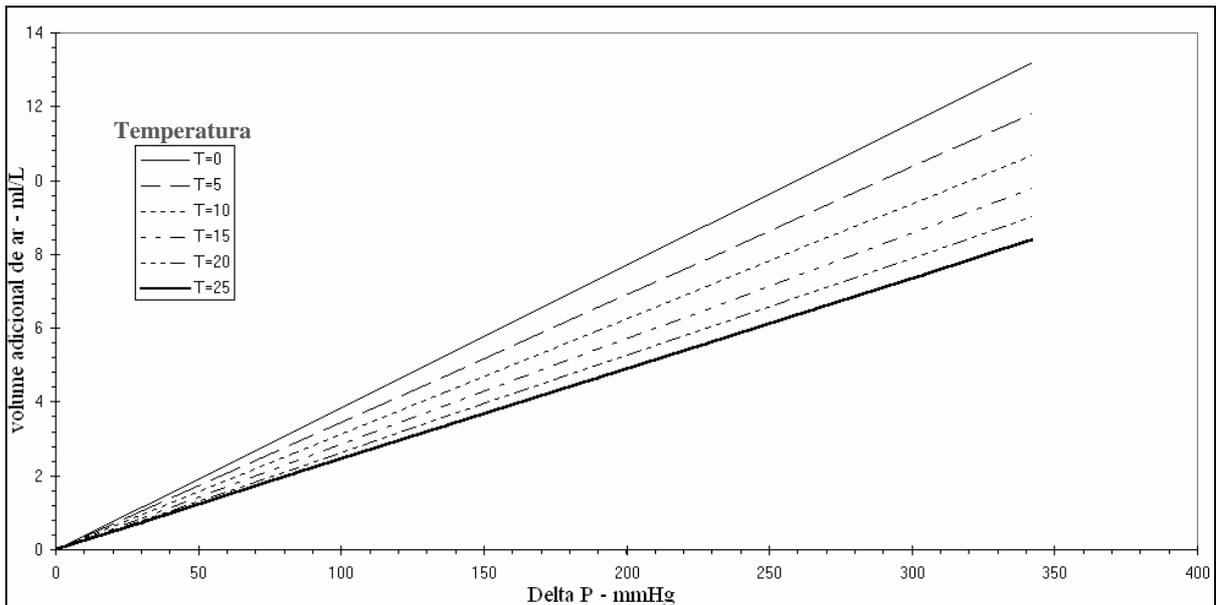


FIGURA 2.9 – Volume excedente de ar requerido para níveis específicos de ΔP
 FONTE – Adaptado de Fidler e Miller (1994).

Os dados apresentados na FIGURA 2.9 são sob condições ideais de temperatura e pressão. Em muitas situações, podem ser necessárias quantidades muito maiores de ar e maiores profundidades de água para atingir o volume correspondente do gás na solução. Por exemplo, o ar que entra sob a forma de grandes bolhas pode, devido à flutuabilidade das bolhas, escapar para a superfície da água antes que uma quantidade substancial de gás seja dissolvida. Por outro lado, se as bolhas forem muito pequenas, a elevada tensão superficial pode facilitar a ruptura, levando a valores próximos aos apresentados na FIGURA 2.9 (Fidler, 1984).

Outra fonte para a supersaturação pode estar relacionada à operação de máquinas em modo síncrono ou compensadores síncronos. Estes procedimentos operacionais são geralmente adotados para a regulação da tensão do sistema de transmissão. A operação em síncrono permite que a unidade geradora parta rapidamente reduzindo o desgaste da turbina e atrasos no fornecimento de energia. Esta modalidade de funcionamento é usada somente para determinadas unidades de geração onde a estabilidade do sistema é exigida. As operações de compensação síncrona são empregadas tanto em usinas térmicas quanto hidroelétricas.

Na condição de operação como compensador síncrono, o distribuidor é fechado, impedindo que a água passe pela turbina e em seguida, na maioria das unidades geradoras, é injetado ar sob pressão na carcaça para que o restante da água no interior da turbina seja removido. A turbina continua a girar a vazio, funcionando basicamente como um motor que regula a tensão fornecendo ou consumindo potência de acordo com a necessidade do sistema.

Como a vedação do distribuidor é geralmente imperfeita, pode ocorrer algum vazamento de água para o interior da cavidade da turbina. Devido aos diferenciais de pressão entre o canal de adução, a cavidade da turbina, a carcaça e o tubo de sucção, a água pode escapar sob alta pressão, tornando-se supersaturada com gás nitrogênio e oxigênio dissolvidos. Uma vez que esta água atinge o canal de fuga, os níveis da saturação de gás podem exceder 110 por cento. A quantidade de supersaturação varia tipicamente com a pressão na adução, assim como tempo de contato entre o ar e a água.

O nível de saturação por oxigênio no canal de fuga dependerá largamente da operação do sistema. Em muitas usinas acontece de algumas unidades estarem funcionando em módulo de geração enquanto que outras funcionam como compensador síncrono. Nestes sistemas, a quantidade de escapamento durante o funcionamento da unidade na modalidade de condensador síncrono seria muito pequena se comparada à quantidade de descarga através das unidades que funcionam na modalidade de geração. Neste caso, a diluição na água pelas turbinas em funcionamento eliminaria o impacto negativo da supersaturação de gás. Na situação onde as unidades sejam operadas na modalidade de compensador síncrono, e não ocorra esta diluição, é possível lançar periodicamente para jusante (canal de fuga) uma determinada descarga de água com o intuito de diluir a saturação de gás acumulada.

2.5.4. Turbulência

A condição de escoamento turbulento pode ser encontrada na maioria das circunstâncias de escoamento da natureza, como também em meios industriais. Por exemplo, encontramos condições de escoamentos turbulentos nos rios, nos oceanos, na atmosfera, nas asas de um avião ou mesmo em órgãos humanos, como pulmão ou coração.

Quanto ao desenvolvimento teórico, os escoamentos turbulentos são modelados pelas equações de Navier-Stokes, para números de Mach inferiores a 15, a partir do qual as escalas dissipativas de Kolmogorov começam a atingir as escalas moleculares. Do ponto de vista prático, umas das características mais importantes da turbulência é o aumento da difusividade das propriedades do escoamento (quantidade de movimento, calor e massa) causado pelo seu desenvolvimento desordenado. É precisamente a avaliação deste incremento da difusividade que os modelos de turbulência buscam determinar. Técnicas modernas de simulação numérica, pelas quais as equações governantes são finamente resolvidas, têm sido um dos

assuntos científicos pesquisados na atualidade e têm se tornado ferramentas acessórias e complementares das ferramentas experimentais para a análise da turbulência de fluidos.

O escoamento turbulento é caracterizado por constantes flutuações. As partículas fluidas se movem de uma maneira altamente aleatória, mesmo se como um todo o escoamento se processa em uma única direção. O que ocorre é que existem intensos movimentos de pequena escala de direções diferentes daquela dada pela direção principal que geralmente é dada com movimentos e vórtices de grande escala (Vogel,1981). Este fato sugere a dificuldade de se obter uma completa descrição do escoamento.

Para muitos dos fenômenos de interesse, entretanto, freqüentemente é suficiente conhecer o valor médio das variáveis de interesse. Estas médias podem ser definidas com respeito ao tempo ou ao espaço.

Diferente do que ocorre no escoamento dito laminar, o escoamento turbulento apenas pode ser definido estatisticamente. O padrão de turbulência em um escoamento turbulento se modifica constantemente com o tempo. Assim, para se descrever a turbulência em um determinado escoamento devem-se levantar as velocidades instantâneas em um ponto de interesse, essenciais para a análise estatística.

A partir da análise estatística das velocidades turbulentas instantâneas, medidas em um determinado tempo, podem-se estimar parâmetros do escoamento turbulento, como por exemplo a intensidade de turbulência (Gordon *et al.*, 1992; Pavlov *et al.*, 2000; Odeh *et al.*, 2002; Enders *et al.*, 2003; Cotel *et al.*, 2006).

A velocidade local em uma região com escoamento turbulento pode ser composta pelo valor da média temporal das velocidades somada a uma componente que representa a flutuação da velocidade em relação à média. O valor instantâneo da velocidade pode ser dado pela soma do valor médio da velocidade em um intervalo de tempo com u_i , que representa a flutuação instantânea. A FIGURA 2.10 apresenta a caracterização da flutuação da velocidade instantânea em relação à média em um escoamento turbulento.

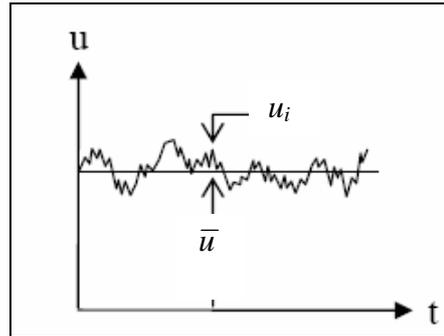


FIGURA 2.10 – Representação da flutuação da velocidade instantânea em relação á média em um escoamento turbulento.

A intensidade das flutuações turbulentas é dada pela média da quantidade de flutuação turbulenta sobre a média. Quando se medem velocidades instantâneas em um determinado ponto, a intensidade turbulenta neste ponto pode ser expressa pela raiz quadrada da média das variações das velocidades medidas em relação à velocidade média, EQUAÇÃO (2.1).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}{n}} \quad (2.1)$$

Sendo:

u_i - valores de velocidade instantânea medida;

\bar{u} - velocidade média do escoamento;

n - números de velocidades instantâneas medidas.

O valor de turbulência é expresso em unidade de velocidade (m/s). Uma alternativa similar de se calcular a intensidade de turbulência relativa (IT) é dada pela EQUAÇÃO 2.2, onde seu valor é obtido pela divisão do desvio padrão (σ) das velocidades pela velocidade média. Esta relação é adimensional.

$$IT = \frac{\sigma}{\bar{u}} \quad (2.2)$$

Valores instantâneos de energia cinética turbulenta podem apresentar uma grande variação, portanto é geralmente útil o cálculo do valor da energia cinética turbulenta média (TKE) do escoamento, por ser mais representativa, EQUAÇÃO (2.3).

$$TKE = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (2.3)$$

Sendo:

u' variação em relação à média temporal da velocidade na direção x

v' variação em relação à média temporal da velocidade na direção y

w' variação em relação à média temporal da velocidade na direção z

(x,y,z) sistema de coordenada de referência - cartesiano

Algumas pesquisas realizadas em laboratório (Pavlov *et al.*, 1982, 2000; Odeh *et al.*, 2002; Enders *et al.*, 2003; Liao *et al.*, 2003) têm mostrado que o comportamento e o deslocamento dos peixes em determinado escoamento está diretamente relacionado ao nível de turbulência presente. O parâmetro dado pela EQUAÇÃO (2.3) tem sido utilizado por alguns trabalhos, principalmente pelos desenvolvidos na Rússia (Pavlov *et al.*, 1982; Pavlov *et al.*, 1994; Lupandin e Pavlov, 1996).

Dentre as características mais importantes dos escoamentos turbulentos, destaca-se a multiplicidade de escalas que os caracterizam, desde as maiores estruturas (baixas frequências), controladas pela geometria que as geram, até as menores estruturas (altas frequências) as quais são controladas pela viscosidade do fluido (Tritton, 1998).

Na natureza, a turbulência pode ocorrer em todas as escalas, desde vórtices criados pelo movimento das nadadeiras do peixe dentro d'água, gerando vórtices em escalas menores do que o tamanho do peixe FIGURA 2.11(a e b) até grandes vórtices em um rio com dimensões muito maiores do que o do peixe FIGURA 2.11(c).

A turbulência do escoamento próximo a uma grande embarcação, por exemplo, pode variar consideravelmente tanto em intensidade quanto em dimensão. Semelhantemente, nas proximidades das estruturas de uma usina hidrelétrica a turbulência ocorre em diferentes intensidades e escalas, dependendo do local. Sabe-se que a forte intensidade de turbulência de pequena e média escalas, a qual peixes são submetidos quanto da passagem pelo sistema das turbinas, pode ocasionar torções e compressões no corpo dos indivíduos, FIGURA 2.11.

Escoamento com turbulência em grande escala, as quais podem ocorrer mais pronunciadamente no tubo de sucção e no canal de fuga, ou em associação com vertimentos,

geram vórtices que podem provocar rotações intensas e conseqüente desorientação aos peixes (Cada *et al.*, 2004).

Cada e Odeh (2001) afirmam que determinados índices de turbulência, causadores de desorientação, mesmo se não provocam danos diretos ao peixe que passam pelas turbinas, podem dispô-los em condições de maior suscetibilidade aos predadores quando atingem o canal de fuga.

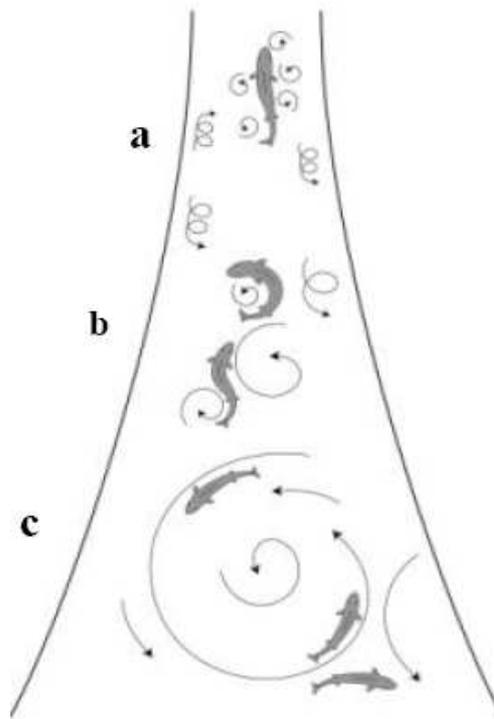


FIGURA 2.11 – Diferentes escalas de turbulência comparada ao tamanho dos peixes.
FONTE – Cada e Odeh (2001).

Inúmeras pesquisas têm mostrado que altos índices de turbulência associada à passagem de peixes por turbinas, vertedores e por sistemas *bypass* presentes nas usinas hidrelétricas podem causar efeitos negativos para o movimento dos peixes em sua migração para montante.

Pesquisadores russos têm estudado sobre a influência da turbulência do escoamento no comportamento dos peixes desde 1970, entretanto somente algumas referências foram disponibilizadas em inglês (Shtaf *et al.*, 1983; Skorobogatov e Pavlov, 1991). Os estudos realizados tiveram como foco maior algumas espécies não migratórias (*roach Rutilus rutilus*, *minnow Phoxinus phoxinus*) e foram mais aprofundados aspectos sobre a capacidade destas espécies de se manterem em escoamentos turbulentos, do que propriamente a utilização da turbulência como forma de auxiliar no deslocamento para a migração. Com o objetivo de

promover a passagem de peixes pelas estruturas de uma usina, estudos em laboratório vêm sendo realizados aliados a análises numéricas, estudos em modelos hidráulicos e testes em protótipos. Estes estudos têm procurado edificar o conhecimento dos possíveis danos associados à passagem por turbinas. Estas informações vêm sendo utilizadas para o desenvolvimento de critérios biológicos para o projeto de novas turbinas assim como para modificações nas unidades existentes a favor da sobrevivência dos peixes.

Davidson (2000) descreveu a natureza da turbulência que pode ser encontrada em diferentes partes em uma casa de máquina equipada com uma turbina Kaplan, e apontou 8 regiões que considerou mais propícias em causar danos aos peixes, conforme mostrado na FIGURA 2.12. Apesar de descrever o trajeto em uma turbina Kaplan, muitas das observações são também válidas para outras condições.

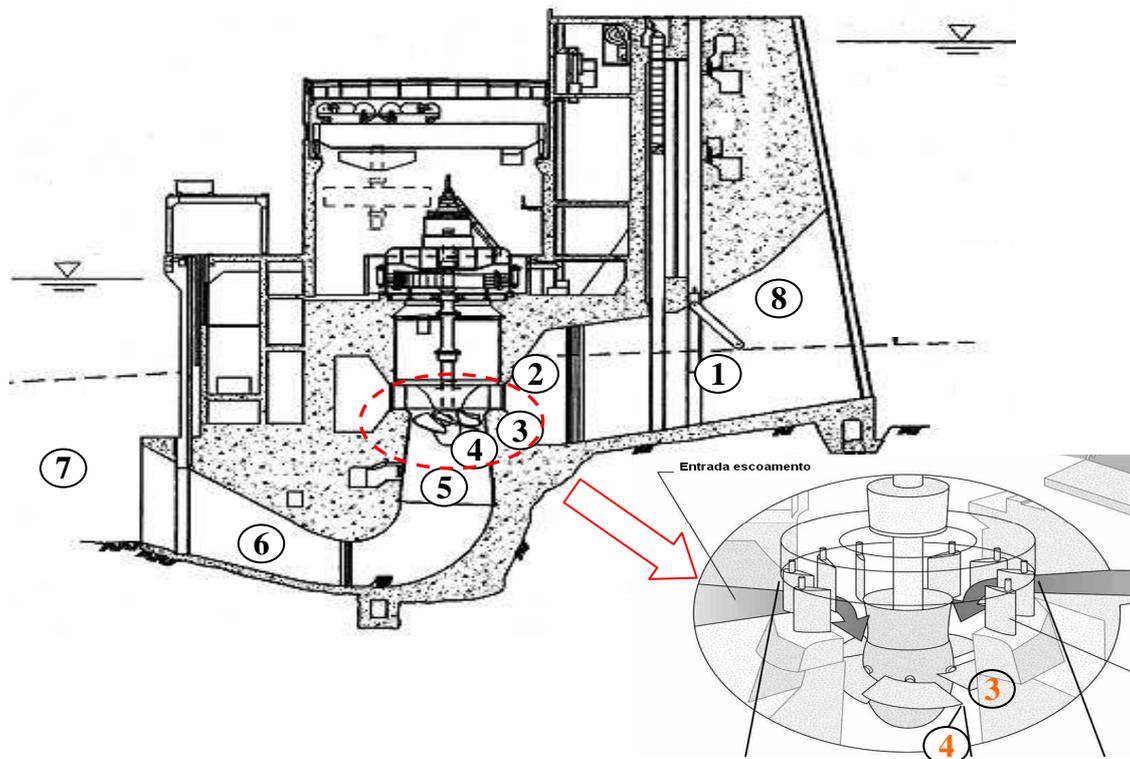


FIGURA 2.12 – As oito regiões onde ocorrem o fenômeno da turbulência consideradas como as mais prejudiciais para os peixes.

FONTE – Adaptado de Davidson (2000)

Região 1 – imediatamente à jusante da tela de proteção e desvio. Região caracterizada por variações de velocidades, alta turbulência na esteira causada pela grade e condições de velocidades cisalhantes moderadas.

Região 2 – à montante e no interior da caixa voluta da turbina. Região caracterizada por velocidades variando entre 2,5 a 4,6 m/s e ocorrência de escoamento turbulento se a tela de

proteção estiver posicionada. Logo, à montante da caixa voluta, redemoinhos podem ser criados causando áreas de aprisionamentos para os peixes.

Região 3 – junto ao distribuidor e aletas móveis (*wicket gates* e *stay vanes*). Velocidade do escoamento acelera rapidamente de cerca de 2,5 m/s a 9,0 m/s. A taxa de cisalhamento é alta nesta região, principalmente próximo a superfícies dos componentes.

Região 4 – rotor. Velocidades muito altas (e tensões cisalhantes) junto às superfícies. Turbulência associada a vórtices nas extremidades das pás e cone do rotor (hub) são desprezadas para jusante em forma de tranças.

Região 5 – à jusante do rotor e início do tubo de sucção. Redução de velocidade (em torno de 12 m/s para 6 m/s) devido ao aumento de seção. A grande possibilidade de danos aos peixes que passam por estas regiões está associada às altas tensões cisalhantes e turbulência devido aos vórtices que saem do rotor.

Região 6 – tubo de sucção. A área da seção transversal continua aumentando resultando em desaceleração da velocidade; ocorrência de alta turbulência e velocidades extremamente não uniformes. Em alguns tubos de sucção, são instalados anteparos para intersectar os vórtices (trança) causando assim grande turbulência e escoamentos reversos.

Região 7 – saída do tubo de sucção e canal de fuga. Com o aumento significativo da seção transversal ocorre a redução da velocidade para cerca de 2,0 m/s. Esta área é caracterizada pela não-uniformidade da distribuição das velocidades (tanto em intensidade quanto em direção do escoamento); ocorrência de turbulência em grandes escalas e a possibilidade de formação de redemoinhos que podem aprisionar os peixes. Acredita-se que as condições nestas regiões possam causar mais desorientação do que realmente danos diretos aos peixes.

Região 8 – à montante da grade inclinada (anteparo) para proteção e desvio de peixes (mecanismos de transposição para jusante) instaladas na tomada d' água. Escoamento com velocidades relativamente baixas (1,5 a 2,2 m/s), pouca turbulência, baixo potencial de danos aos peixes. Os componentes horizontais das telas de proteção podem causar correntes turbulentas que se propagam em até 10 metros para jusante, alterando a distribuição das velocidades.

2.5.5. Esforços cisalhantes

Lesões e mortes podem ser causadas por cisalhamento quando o peixe passa por regiões onde o escoamento experimenta um gradiente de velocidade suficientemente intenso a ponto de causar danos aos peixes (Franke *et al.*,1997).

Cisalhamento é uma propriedade que envolve um gradiente de velocidade. A velocidade da água é importante para transportar organismos ou seus alimentos e para criar habitat aquáticos em um curso natural. Em canais artificiais, onde as velocidades são razoavelmente uniformes, um peixe que se move a baixa velocidade ou alta velocidade, não será lesado nem sofrerá desorientação. Entretanto, quando os gradientes das velocidades da água mudam em escalas comparáveis ao tamanho de um peixe, tensões cisalhantes prejudiciais podem ocorrer em qualquer sistema hidráulico. Tensão cisalhante é diretamente proporcional à diferença de velocidade da água sobre a distância (taxa de tensão do líquido), ou seja, se a diferença entre as velocidades de duas massas de água adjacentes for 3 m/s sobre uma distância de 0,1 metro, o gradiente de velocidade seria 30 m/s/m.

Tensão cisalhante é dada na mesma unidade de pressão, unidade de força por unidade de área (por exemplo, N/m²). Uma determinada tensão cisalhante pode ser sofrida por peixes que passam entre duas massas de água de diferentes velocidades ou quando deslizam no contato com estruturas sólidas, como paredes e pás de turbinas, ocorrendo abrasão. Lesões podem ocorrer próximas às estruturas devido a grandes tensões cisalhantes entre a camada de água e a estrutura, mesmo quando não ocorre contato com a superfície sólida.

Segundo Cada (1999), tensões cisalhantes encontradas em cursos de água naturais geralmente são menores do que 200 N/m². Por ser o habitat natural de peixes, este valor não causa nenhum prejuízo a eles. Em condições de inundações em pequenas bacias, valores médios podem variar de 61 N/m² a 858 N/m² em decorrência de picos de vazão.

A maioria das lesões causada pela passagem de peixes por turbinas aparentemente ocorre nas proximidades do rotor (Cada *et al.*,1997; Turnpenney, 1998). No interior de uma turbina hidráulica, estima-se que os maiores valores de tensões cisalhantes ocorram em camadas bem próximas às partes mecânicas e associadas a vórtices próximos à extremidade das pás (*blade tip vortex*), próximos ao cubo da turbina (*hub leakage vortex*) e no centro de turbinas tipo Francis (vórtice em trança – *rope vortex*).

Segundo McEwen e Scobie (1992), *apud* Cada e Odeh (2001), os valores médios de 500 N/m^2 são encontrados em turbina tipo bulbo e valores máximos de 3740 N/m^2 e 5421 N/m^2 são estimados dependendo das condições de operação, ocorrendo os valores maiores quando a turbina trabalha fora da sua rotação nominal, FIGURA 2.13.

Os efeitos de cisalhamento hidrodinâmico foram testados e os resultados foram apresentados por Garrison *et al.* (2002), conforme Lei da viscosidade de Newton EQ.(2.4).

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \leq 1600 \text{ N/m}^2 \quad (2.4)$$

Onde:

τ [N/m^2] – tensão de cisalhamento máxima;

μ [$\text{N} \cdot \text{s/m}^2$] – viscosidade dinâmica da água;

du [m/s] – velocidade do escoamento;

dy [m] – distância (perpendicular ao escoamento).



FIGURA 2.13 – Simulação em turbina amigável. Os pontos em destaque mostram as partes da turbina onde a taxa de cisalhamento atingem valores superiores a 500 /s.
FONTE – Adaptado de Hecker e Cook (2005).

2.5.6. Cavitação

Cavitação é um fenômeno conhecido pela decorrência do colapso abrupto de bolhas de gás ou de vapor de água que se formam em áreas de baixas pressões, como na parte inferior das pás do rotor, e implodem quando passam por áreas de pressões maiores no tubo de sucção.

Dependendo da geometria da região que está sob condições de pressão de vapor, das condições de pressão e dos gradientes de velocidades envolvidos, os colapsos das bolhas podem gerar intensas ondas de pressão, jatos de alta velocidade e intensas condições de turbulência (Franke, 1997).

Este fenômeno acontece em determinadas condições de operação das turbinas. Pouco se conhece sobre os efeitos da passagem de peixes por áreas onde ocorre a cavitação. Entretanto, os efeitos de erosão nas pás e outras estruturas de metal são facilmente perceptíveis em decorrência desse fenômeno, podendo sugerir que estas regiões são potencialmente danosas para os peixes.

2.6. Sistemas sensoriais dos peixes e suas respostas às variáveis hidráulicas

Os peixes em seu habitat natural apresentam comportamentos reotáxicos em resposta a uma percepção detalhada de seu ambiente hidrodinâmico sendo altamente adaptados em detectar mínimas alterações, tais como a força e sentido do escoamento (Montgomery *et al.*, 1997; 2000), aceleração (Hudspeth, 1989), som (Knudsen *et al.*, 1992) e pressões hidrostáticas (Coutant e Whitney, 2000; Ferguson, 2005).

Os ambientes aquáticos são ricos em sinais acústicos e hidrodinâmicos (Baigún *et al.*, 2007), porque tudo que se movimenta em relação a um fluido causa alguma alteração neste meio. Os peixes possuem um sofisticado sistema sensorial que os permite sobreviver em seu ambiente aquático. Este sistema é composto por três subsistemas distintos que permitem que percebam o som tanto à distância, através de ondas de pressão, ou em seu entorno através do movimento das partículas. Estes subsistemas são:

- i. a audição ou órgãos de audição;
- ii. os órgãos de equilíbrio;
- iii. os neuromastos superficiais (em canais ou sistema da linha lateral) para detectar o movimento de partículas na água, e em particular variações ao longo do seu corpo (Ferguson, 2005).

A linha lateral trabalha como um sensor mecânico, onde neuromastos estão distribuídos superficialmente ao longo do corpo do peixe. Neuromastos são sensores receptores compostos por grupos de células capilares fixas a uma cúpula, que ao se movimentar pela ação da água, estimula tais células enviando impulsos neurais para o cérebro (Moyle e Cech Jr., 2000).

Os neuromastos em canais são compostos por centenas de fibras nervosas, e acredita-se que variações nos movimentos das partículas ao longo da linha lateral podem ser detectadas porque a amplitude do movimento diminui com o cubo da distância da fonte. Acredita-se que características da fase e amplitude do sinal fornecem informações detalhadas do tipo de fonte e localização do “ruído”. Até mesmo objetos parados podem ser detectados se o peixe estiver nadando. Portanto, os sistemas sensoriais dos peixes possibilitam uma gama de informações necessárias para a orientação em seus ambientes assim como a detecção de outros peixes (Ferguson, 2005).

Alguns estudos têm mostrado que danos aos sistemas sensoriais ou motor dos peixes têm aumentado a vulnerabilidade dos peixes estudados. Mesa e Warren (1997) descrevem que os testes realizados com espécies de salmão juvenis que sofreram extensa obstrução dos filamentos da linha lateral e das brânquias por embolia tornaram-se significativamente mais vulneráveis a predadores. Portanto, uma das questões que se deve considerar quando da passagem de peixes pelas barragens é permitir condições hidrodinâmicas adequadas que não danifiquem os sistemas sensoriais dos peixes e conseqüentemente sua capacidade de se orientar nos ambientes dos rios e perceber predadores (Lundqvist e Ferguson , 2005)

Conforme relata Lucas e Baras (2000), os avanços na tecnologia da telemetria têm permitido o mapeamento tridimensional (3-D) dos deslocamentos dos peixes fazendo com que a modelagem dinâmica computacional dos escoamentos possa agora descrever os campos de velocidade em escalas que são significativas para os peixes, e os estudos em laboratório têm procurado definir as capacidades sensoriais dos peixes de distinguir diferentes campos da velocidade.

A análise dos resultados obtidos quanto às respostas biológicas de algumas espécies aliada às novas tecnologias de modelagem 3-D do posicionamento dos peixes têm sido recentemente utilizadas para melhorar a eficiência dos projetos de sistema de desvio dos peixes no trânsito de montante para jusante (Nestler *et al.*, 2002; Goodwin *et al.*, 2006; Ferguson , 2005) assim como no estudo do deslocamento dos peixes frente a outros dispositivos.

2.7. Levantamento de parâmetros biológicos

2.7.1. Estudos sobre impactos na ictiofauna junto aos sistemas das usinas hidrelétricas

Para a determinação do melhor posicionamento da entrada para mecanismos de transposição de peixes, é necessário o monitoramento das rotas migratórias das populações de peixes. Este monitoramento vem sendo realizado através da técnica de biotelemetria. Essa tecnologia consiste na implantação de radiotransmissores geralmente na cavidade abdominal dos peixes, permitindo sua localização e a definição de áreas de concentração por meio de estações de recepção.

A biotelemetria é utilizada em larga escala em estudos de migração, como no caso dos salmões, na América do Norte e Europa e há menos tempo também tem sido utilizada em

pesquisas brasileiras. Assim como ressalta Pavlov (1989), a introdução desta técnica possibilitou o estudo do comportamento dos peixes em zonas operacionais de sistemas hidráulicos. É possível registrar a movimentação de indivíduos, sua localização dentro da área monitorada a qualquer momento, sua velocidade, padrões diários e outras características (Webb, 1989; Gowans *et al.*, 1999).

2.7.2. Passagens de peixes por turbinas

Inúmeras são as variáveis associadas à passagem de peixes pelas turbinas que podem causar prejuízo a estas espécies. Dentre as chamadas variáveis físicas, Ferguson (2005) inclui o tipo de turbina e velocidade de rotação, a eficiência da unidade geradora, a altura da barragem, a posição do rotor da máquina em relação à cota de saída no canal de fuga, a velocidade relativa de deslocamento do peixe durante os impactos com as pás da turbina e as aberturas entre componentes fixos e móveis, tais como da extremidade da pá e o anel de descarga (*blade tips e discharge rings*). A partir de alguns estudos realizados, algumas considerações em relação a estas variáveis físicas e a ocorrência de mortalidade de peixes foram pré-estabelecidas, podendo ser citadas:

- a mortalidade das turbinas tipo Francis é, em geral, maior do que nas turbinas Kaplan;
- a mortalidade aumenta com o aumento da queda, assim como com o aumento da velocidade de rotação e conseqüentemente velocidade periférica no rotor em turbinas Francis;
- a mortalidade deve diminuir com o aumento do diâmetro;
- e a mortalidade aumenta com a redução da submersão do rotor.

Ainda segundo Ferguson (2005), as variáveis biológicas incluem o tamanho e peso dos peixes, facilidade de lesão nos tecidos (específico para cada espécie e idade), rigidez e, no caso das turbinas Kaplan, o deslocamento dos peixes em relação às pás das turbinas.

2.7.3. Turbinas “amigáveis”

A morte e/ou lesões de peixes que passaram pelas turbinas hidráulicas são o resultado de algumas condições, que incluem variações extremas e abruptas de pressão, cavitação, choques

mecânicos, esmagamentos, turbulência e tensões cisalhantes (Cada *et al.* 1997, 2004, Turnpenny, 1998). Apesar de já terem sido identificadas as condições potencialmente prejudiciais, até onde a literatura recente descreve, pouco se conhece quanto a localização e magnitude destas condições no interior das turbinas. O Departamento de Energia dos EUA (DOE), durante a última década, tem apoiado, através do *Hydropower Program*, o desenvolvimento de turbinas “ambientalmente amigáveis”, também conhecidas como “turbinas amigáveis” (*friendly - turbine*) ou seja, turbinas nas quais, características como a viabilidade da passagem de peixes são destacadas. Segundo pesquisadores do programa, a nova geração de turbinas poderá ser empregada em novos empreendimentos ou na substituição de turbinas existentes durante etapas de condicionamento de usinas. O objetivo principal deste programa consiste no desenvolvimento de turbinas que permitam a sustentabilidade da produção de energia de uma determinada usina e minimizem os danos causados aos peixes e à restrição de seus habitat migratórios.

Os estudos realizados pelo programa acima citado abrangem três vertentes: 1) desenvolvimento e testes de instrumentos (para medição das condições no interior das turbinas); 2) testes biológicos (para verificar a resposta de peixes sob condições adversas); e 3) modelagem computacional (para auxiliar no projeto das novas turbinas estendendo os resultados das medições e variáveis biológicas às condições não estudadas).

2.7.4. Considerações e critérios biológicos para o projeto de Turbinas “amigáveis”

Historicamente, estudos sobre mortalidade foram produzidos para razões diferentes que a de estabelecer critérios de projeto a serem utilizados na construção de turbinas amigáveis. Entretanto, diversos critérios baseados em informações biológicas, atualmente disponíveis, fornecem uma orientação ao projeto, melhoria, e avaliação do funcionamento de turbinas.

A TABELA 2.2 apresenta uma lista de critérios que foram adotados pela equipe da ARL/NREC para o projeto e a avaliação destes mecanismos (Odeh, 1999).

TABELA 2.2 - Lista de critérios e considerações biológicas para projetos de turbinas amigáveis

Descrição dos Critérios	Valores adotados	Justificativa
Rotor das turbinas amigáveis	Novo projeto do rotor	Objetivo do projeto
Parâmetros para o Projeto Hidráulico	Vazão = 1.000 m ³ /s Altura de Queda = (23 – 30 m)	Representa a maior parte das UHE's instaladas com turbinas Kaplan e Francis
Eficiência de operação da Turbina	Mínimo de 85 %	O valor adotado corresponde ao mínimo valor, para o novo rotor, que garante uma competitividade com as atuais turbinas que têm eficiência entre 90 e 95%.
Velocidade Periférica no rotor	Menor que 12 m/s (preferencialmente 6 m/s)	Reduz os danos causados por choque mecânico e minimiza as tensões cisalhantes e os vórtices formados entre os componentes fixos e móveis da turbina
Mínimas Pressões	6,9 m.c.a. (68,8 kPa) (pressão absoluta)	A passagem dos peixes para jusante geralmente acontece da profundidade de 10 metros (~204 kPa). A mortalidade acontece quanto a pressão reduz para valores < 30% da pressão de aclimação
Taxa de Variação de Pressão	Menor que 55,0 m.c.a./s (550 kPa/s)	Considerando que danos são causados a taxas maiores que 28,0 m.c.a./s (280 kPa/s) em turbinas Kaplan
Indicação da tensão cisalhante (taxa de cisalhamento)	Menor que 180 m/s/m ou 180 /s	Testes em alevinos (ARL), considerado frágeis, não tiveram danos a taxas de 180 m/s/m
Quantidade e espessura do perfil das pás	Reduzir	Menor número e com espessuras menores reduz a possibilidade de choques mecânicos
Espaçamento entre o rotor e as partes fixas do entorno	Menor ou igual a 2mm	Menores espaçamentos reduz possibilidade de danos mecânicos
Abertura para passagem do fluxo	Aumentar	Grande massa de água entre as pás reduz a possibilidade de danos por abrasão, mantendo os peixes mais distantes das pás.

Fonte – Adaptado de Odeh, 1999.

2.7.5. Aparatos desenvolvidos para levantamento de parâmetros biológicos

Parâmetros biológicos podem ser levantados a partir de estudos tanto em laboratório quanto em campo. A principal vantagem dos estudos em laboratório caracteriza-se pela possibilidade de distinguir e examinar cada fonte de danos individualmente sob condições controladas. Outra vantagem reside no fato de se poder alterar a magnitude de cada variável e simular as diferentes condições encontradas em cada empreendimento hidrelétrico (Cada, 1997). Por outro lado, estudos realizados em campo apresentam a vantagem de representarem as condições reais, reduzindo os riscos de correlações equivocadas.

Na passagem de peixes por turbinas, por exemplo, os indivíduos não sofrem apenas efeitos de pressão ou de cisalhamento. Ao contrário, os peixes são submetidos a uma combinação de condições desfavoráveis (pressão, cisalhamentos, choques mecânicos, etc) simultaneamente. Portanto, existe um potencial dos efeitos não-acumulativos serem tanto maiores quanto menores que os efeitos observados separadamente. Conforme afirma Pavlov (2008), o levantamento dos efeitos de variáveis combinadas é extremamente difícil de ser realizado em laboratório. Sendo assim, a maioria dos testes realizados em laboratório, para a caracterização dos limitantes biológicos de algumas espécies de peixes, restringe-se ao estudo do efeito de um determinado fenômeno.

A proposta deste item é apresentar técnicas e aparatos experimentais que vêm sendo utilizados para a avaliação dos danos causados a algumas espécies de peixes estudadas associados às variáveis hidráulicas encontradas quando da passagem por turbinas e regiões adjacentes.

2.7.5.1. Aparatos e técnicas para a determinação dos efeitos da variação de pressão e supersaturação

Estudos relacionados a efeito de pressão em peixes vêm sendo conduzidos há mais de um século, principalmente com o objetivo de entender a fisiologia de peixes que vivem em grandes profundidades oceânicas. Entretanto serão descritos aqui os relativamente recentes estudos de variação de pressão por passagem por turbina.

Harvey (1963) *apud* Cada (1997) estudou os efeitos de aumento de pressão com salmões em estágios iniciais de vida (*sockeye salmon fry e smolts*) utilizando uma câmara cilíndrica de aço

(0,91 m de comprimento e 0,30 m de diâmetro). Em uma das extremidades do aparato utilizado foi adaptado um flange preso por parafusos. A pressão era aplicada por uma bomba regulada por válvulas e um sistema de bypass, podendo variar de 101,33 kPa a 2.127,83 kPa (1 a 21 atmosferas). A taxa de incremento máximo de pressão era de 69 kPa/s e o retorno à pressão atmosfera podia ser realizado instantaneamente.

Knable e Feathers (1983) apontaram como falhas nas técnicas utilizadas nos testes anteriormente descritos a utilização de ar comprimido para aumentar a pressão no interior da câmara de teste. Segundo os autores, esta técnica poderia resultar em supersaturação de gases e conseqüentemente causar o acréscimo de efeitos prejudiciais para os peixes testados, além dos monitorados pela variação de pressão. Assim, estes autores prepuseram um aparato que consistia em uma grande câmara de testes metálica (2,00 m comprimento e 0,70 m de diâmetro), confeccionado com chapas de aço de 6,4 mm e capacidade para 853 litros, conforme mostrado na FIGURA 2.14. Sua faixa operacional de pressão era de até 520 kPa, com incrementos de pressão da ordem de 40 kPa/s. Este aparato apresenta como vantagens o tamanho do compartimento, o que possibilita testes simultâneos com maior número de indivíduos, e renovação contínua de água do interior, melhorando as condições de oxigenação durante o experimento.

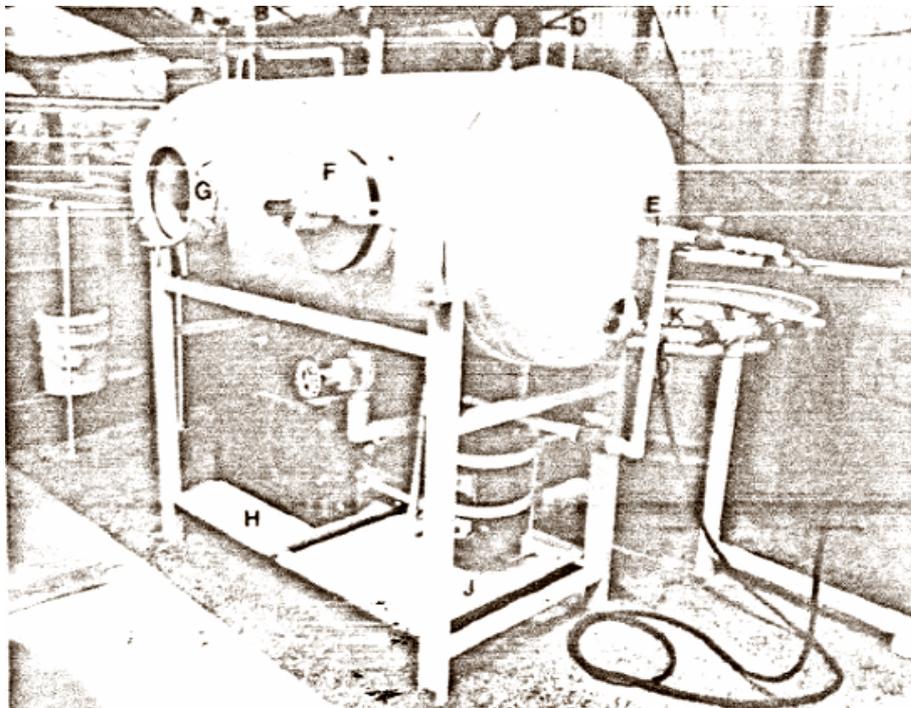


FIGURA 2.14 – Câmara hiperbárica e sistemas de operação para testes de descompressão: E) tubulação de alimentação, F) compartimento de acesso, G) abertura de visualização, H) bomba, J) válvula de descarga e tanque de acumulação, e K) reservatório.

FONTE – Knable e Feathers (1983)

Para verificar o fenômeno da passagem de peixe, anteriormente aclimatados à água supersaturada, Montgomery (1995) testou espécimes de truta arco-íris (jovens “smolt”) a diferentes níveis de pressão e saturação de gases dissolvidos em câmaras. O sistema consistia em dois cilindros de acrílico, cada um medindo 0,55 m de comprimento e 0,27 m de diâmetro, FIGURA 2.15 e FIGURA 2.16, conectados a um sistema hidráulico pneumático, sistema de controle e sistema de alimentação. As câmaras eram conectadas a cilindros hidráulicos que por sua vez eram conectados a cilindros pneumáticos. Estes cilindros eram acionados por um sistema de pressurização controlado por computador, permitindo assim o posicionamento dos cilindros hidráulicos pressurizando ou despressurizando as câmaras de testes. O sistema de controle também controlava a concentração de gases dissolvidos. A faixa de trabalho deste aparato permitia a variação da pressão de 300 kPa para a pressão de vapor em 0,1 segundo.

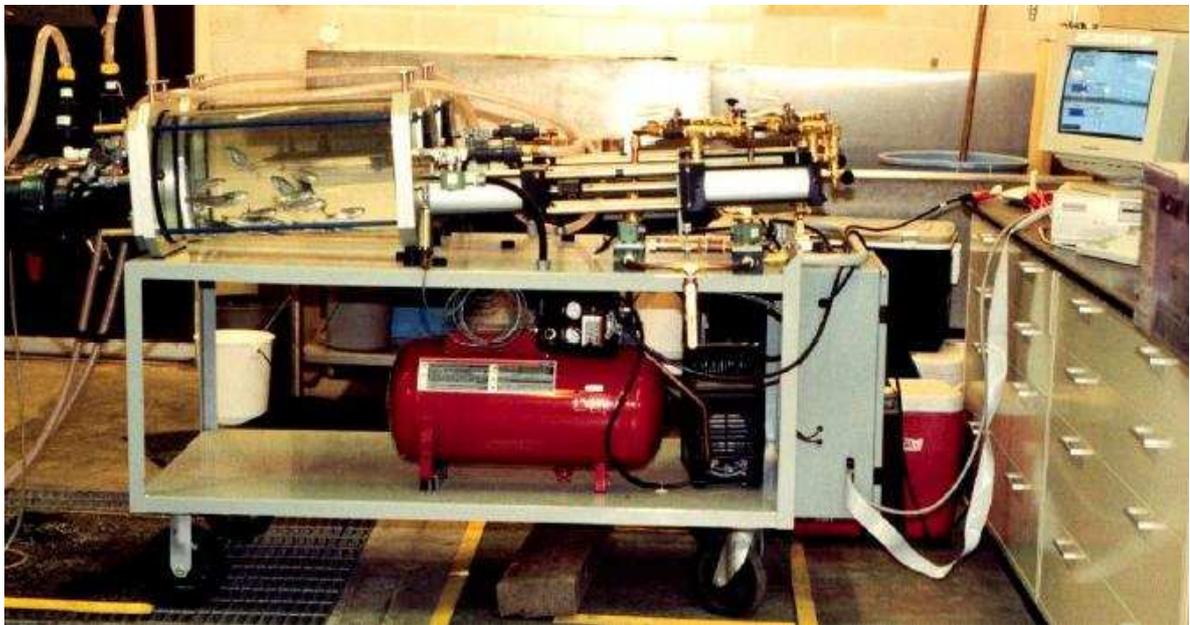


FIGURA 2.15 – Sistema simulador de passagem por turbina

FONTE – Montgomery Watson (1995); Abernethy *et al.*, 2001, Carlson e Abernethy (2005).

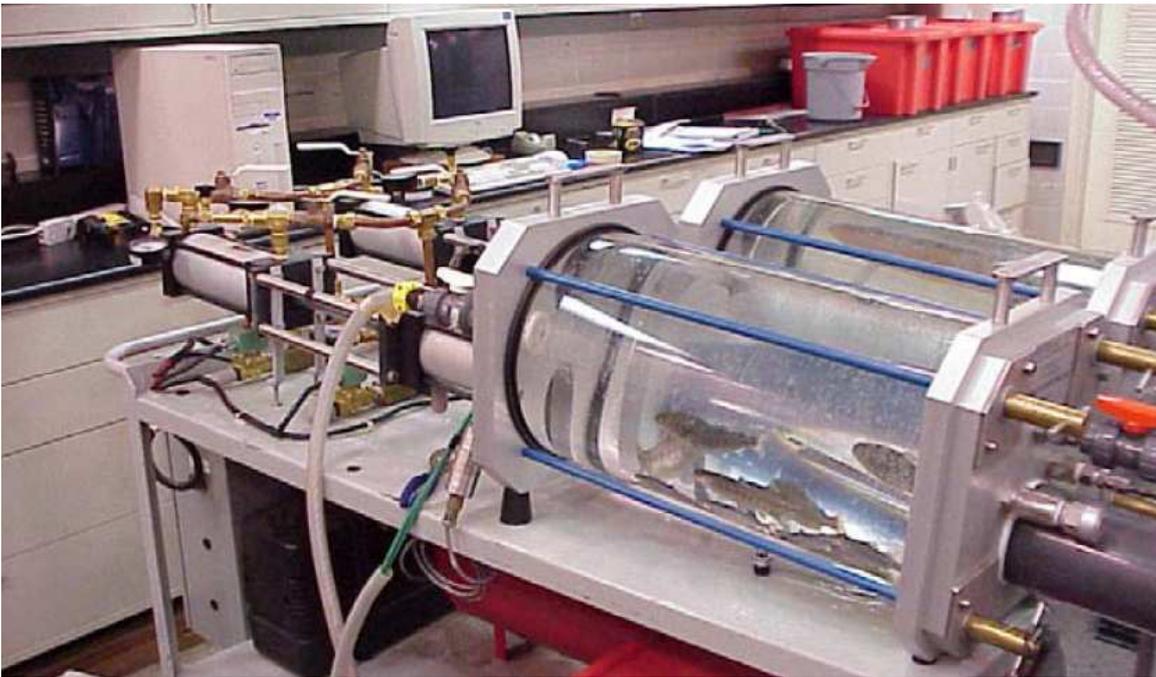


FIGURA 2.16 - Sistema simulador de passagem por turbina - B
 FONTE – Carlson e Abernethy (2005).

Com o aparato descrito foram realizadas simulações da possível seqüência de pressão percebida pela passagem por uma típica turbina Kaplan instalada na usina de McNary no Rio Columbia (EUA). A seqüência simulada consistiu de 4 fases de operação, conforme descritas na TABELA 2.3.

TABELA 2.3 - Pressões e duração durante a série de vazão reproduzida em laboratório

Fases	Pressão inicial (kPa)	Pressão final (kPa)	Duração (s)
Inicial	Pressão atmosférica (101)	300	30 a 60
Transiente	300	2	0,1
Baixa pressão	2	Pressões próximas à pressão de vapor da água	0,25
Recuperação	Pressões próximas à pressão de vapor da água	115 a 120	30 a 60

FONTE – Adaptado de Montgomery, 1995.

Nos experimentos realizados por Montgomery (1995), foram testados simultaneamente dois grupos com 20 indivíduos em cada câmara e com o tamanho variando entre 9 e 10 cm de comprimento. Em apenas uma das câmaras, era realizada a seqüência completa de pressões. A outra câmara era submetida apenas à fase inicial, correspondendo assim, ao teste controle para posterior comparação dos resultados.

A FIGURA 2.17 mostra a reação dos peixes no momento da fase transiente da seqüência de pressão simulado pela câmara. Testes com o mesmo aparato e metodologia similar foram realizados por Abernethy et al. (2001); Abernethy e Cada (2002); Carlson e Abernethy (2005); para outras espécies de peixes (*fall chinook salmon*, *bluegill*, *American shad* (*Alosa sapidissima*), enguias do pacífico (*Entosphenus tridentatus*).



FIGURA 2.17 – Efeito nos peixes no momento de descompressão rápida pelo simulador de passagem por turbina.

FONTE – Abernethy *et al.* 2001.

Os testes realizados por Abernethy e Cada (2002) diferem dos anteriores (Montgomery, 1995; e Abernethy e Cada, 2002), pois simula uma seqüência de pressões para a operação de uma turbina Kaplan sob condições mais “amigáveis” para os peixes. A seqüência consistia no aumento gradual da pressão até 405,3 kPa (4 atmosferas) seguido de uma redução rápida (0,1 segundo) até 50,7 kPa (0,5 atmosfera) e posterior retorno gradual para 101,3 kPa (1 atmosfera) de pressão.

A FIGURA 2.18 mostra graficamente a comparação entre a seqüência de pressão simulada para a pior condição de operação para uma típica turbina Kaplan e para condições de operação de uma turbina Kaplan modificada. Os resultados obtidos mostram que a alteração nas condições de operação, aumentando o valor de pressão na condição de sub-pressão junto às pás do rotor, pode reduzir a taxa de danos e mortes causadas nas espécies estudadas.

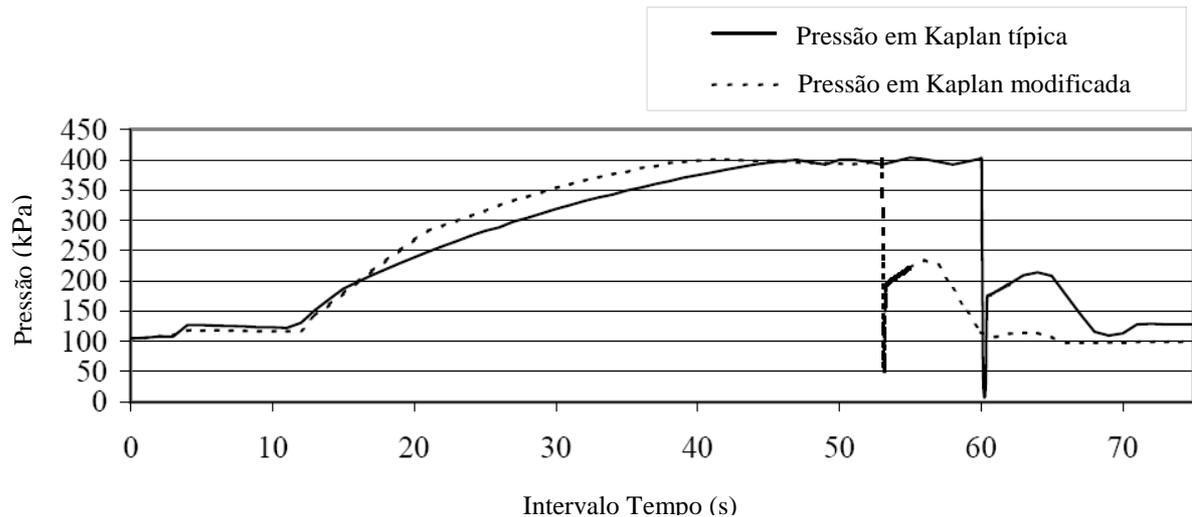


FIGURA 2.18 – Comparação entre os regimes de pressão durante a operação de uma Kaplan típica e sob uma Kaplan modificada, reduzindo a pressão mínima atingida.
 FONTE – Adaptado de Abernethy e Cada, 2002.

Carlson e Abernethy (2005) utilizaram o mesmo aparato, mostrado nas FIGURA 2.15 e FIGURA 2.16, entretanto simularam uma série diferente de pressões, incorporando a fase de aclimação a 50, 101 e 202 kPa, equivalentes a profundidades de aproximadamente 4,6 m , 9 m e 18 metros, durante um período de 22 a 24 horas. Durante a fase de aclimação, era mantido o sistema de aeração da câmara.

Os aparatos e método para a avaliação do efeito de pressão mais recentemente desenvolvidos, principalmente os desenvolvidos pelo PNNL-*Pacific Northwest National Laboratory*, incorporaram o controle da supersaturação dos gases dissolvidos da água que é utilizada nos testes. A FIGURA 2.19 mostra o sistema para o condicionamento e sensores para o monitoramento da supersaturação de gases em níveis pré-definidos.



FIGURA 2.19 – Sistema para a supersaturação de gases dissolvidos na água e sensores de medição (saturômetro)

FONTE – Neitzel *et al.*, 2004 (PNNL-14748)

De maneira geral, todos os aparatos para a avaliação dos efeitos de pressão em laboratório encontrados na bibliografia pesquisada consistem de câmaras cilíndricas para a introdução dos peixes e exposição de regimes de pressão em determinado tempo.

2.7.5.2. Aparatos para a determinação dos efeitos de turbulência

O levantamento dos efeitos da turbulência está diretamente relacionado aos aparatos para levantamento dos efeitos de tensões cisalhantes, pois como foi discutido anteriormente, a ocorrência de escoamentos turbulentos, gerados, por exemplo, por jatos possuem uma grande potencial cisalhante nos peixes. Nesta seção serão apresentados apenas os testes que tiveram como foco a turbulência em níveis passíveis de ocorrer à jusante das usinas, que de forma geral objetivaram o levantamento das causas indiretas de mortalidade, associada à desorientação, perda de equilíbrio e conseqüente susceptividade à predação.

Heisey *et al.* (2000) catalogaram os danos observados em peixes que passaram por turbinas de centrais hidrelétricas do noroeste dos EUA. Nos 10 estudos levantados, a perda de equilíbrio

foi notada em 0,4 a 4,1 % dos peixes que passaram por turbinas, o que, segundo o autor, foi atribuído aos efeitos da turbulência.

Cada e Odeh (2001) descreveram o aparato desenvolvido denominado câmara de turbulência - “*Turbulence Chamber*”. Este sistema consiste basicamente em um tanque construído em perfis metálicos e chapas de acrílico nos lados e fundo, medindo 1,22 m de largura, 3,00 m comprimento e 1,22 m de profundidade. A FIGURA 2.20 apresenta um diagrama esquemático da câmara onde podem ser vistos a localização dos bocais que são usados para variar os jatos que escoam dentro da compartimento de medida. A abertura e a direção dos jatos são ajustadas de acordo com as condições de turbulência desejada. O painel lateral onde ficam os bocais pode acomodar até 40 bocais, de até 19 mm de diâmetro cada. O sistema de bombeamento possui uma vazão máxima de $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$. Uma tela inclinada e abaulada é posicionada no interior da câmara para reduzir áreas de refúgio e proteger os peixes do impacto com arestas e sistema de saída (sucção). Uma comporta ajustável na saída do canal controla o nível dentro da câmara. A área efetiva para os testes representa a região do canal de fuga, FIGURA 2.21. Uma tela posicionada a 0,10 m na frente dos bocais impede que os jatos atinjam os peixes diretamente, FIGURA 2.22. As laterais em acrílico facilitam a observação não-intrusiva e filmagem dos peixes pela parte externa do aparato. Todo o aparato é envolto por uma cortina escura para facilitar o controle da iluminação e prevenir distúrbios pelo movimento de pessoas no entorno durante os testes.

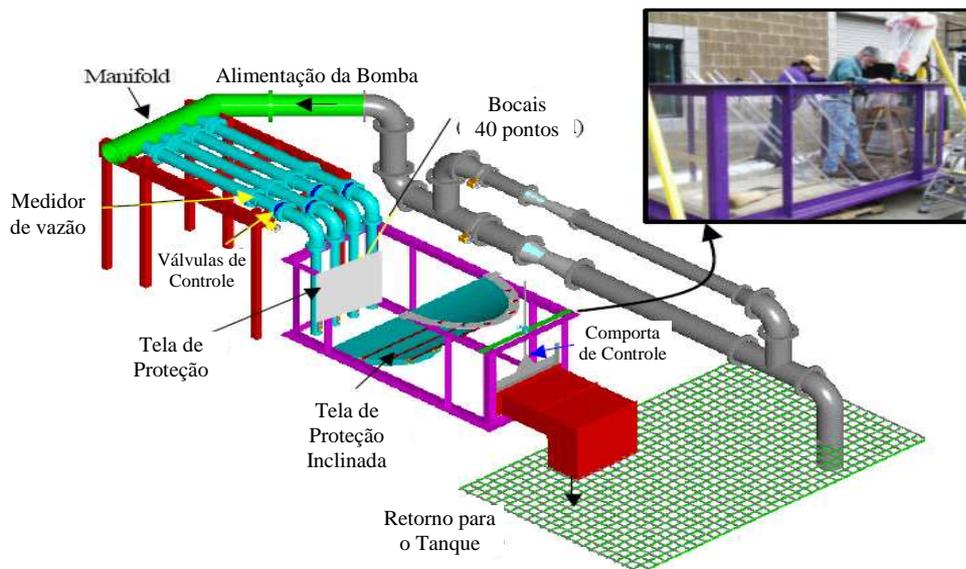


FIGURA 2.20 – Diagrama esquemático da bancada de testes de turbulência
 FONTE – Cada e Odeh, (2001) e Odeh *et al.* (2002)



FIGURA 2.21 – Foto da câmara de turbulência da bancada de testes.
 FONTE – Odeh *et al.* (2002)

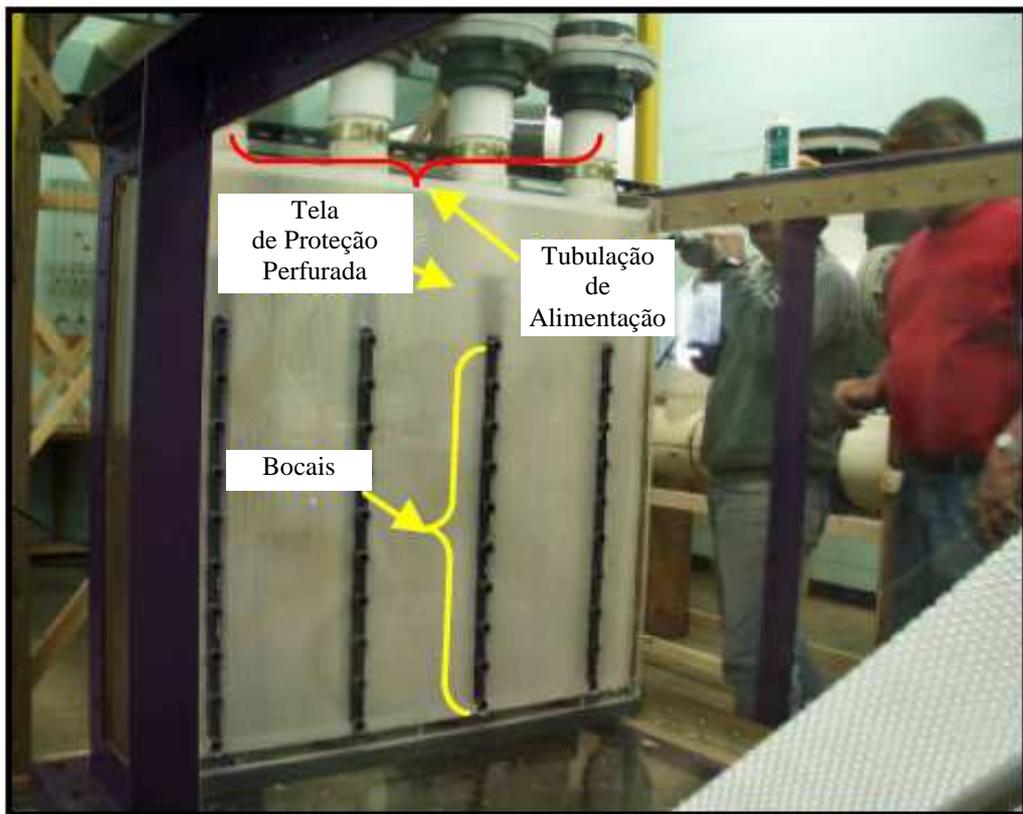


FIGURA 2.22– Tela de proteção na saída dos bocais de injeção.
 FONTE – Odeh *et al.* (2002)

Cada *et al.*(2003) descreveram os estudos realizados para a caracterização do comportamento de duas espécies de peixes norte americanas após serem submetidas a diferentes intensidades de turbulência associadas às condições encontradas à jusante de barragens, no tubo de sucção e canal de fuga. O aparato de testes consiste de um tanque de fibra partitionado por placas de plástico branco. Os divisores definem uma região de observação de (1,00 m x 0,55 m), considerada suficiente para a observação da reação dos peixes e adequada para a janela de visão da câmera de filmagem. O nível era mantido a 0,19 m para restringir a movimentação vertical dos peixes. Para se estabelecerem as condições turbulentas no aparato, eram utilizados bombas submersas e aeradores no fundo do tanque conforme mostrado na FIGURA 2.23. Após submeter um determinado peixe ao estresse da câmara de turbulência por 30, 20 ou 10 minutos, a reação, a partir de um estímulo, era observada e filmada com uma câmera de alta velocidade.

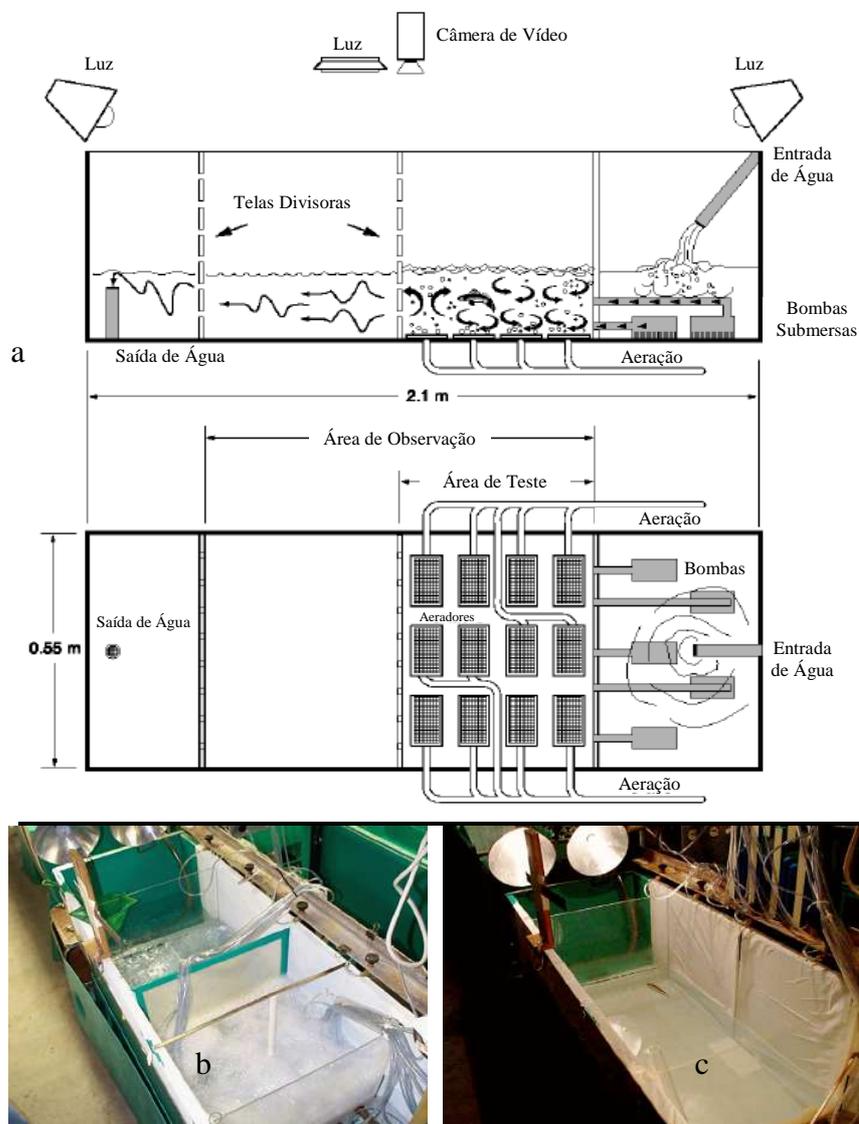


FIGURA 2.23 – a) Arranjo esquemático da bancada de testes; b) foto do tanque de observação e c) foto da área de estresse por turbulência
 FONTE – Cada *et al.* (2003)

2.7.5.3. Aparato para o levantamento dos efeitos de cisalhamento

Como parte do programa de pesquisa para o desenvolvimento de novas turbinas - *Advanced Hydropower Turbine System* (AHTS), o laboratório *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL) realizou estudos em jovens salmões e outras espécies submetendo-os a um jato submerso de água para quantificar os danos causados pelas tensões cisalhantes (Neitzel *et al.*, 2000).

Os testes descritos por Guensch *et al.* (2002) e Neitzel *et al.* (2000) foram realizados utilizando um canal em fibra de vidro de 9 m de comprimento, 1,20 m de largura e 1,20 m de profundidade, FIGURA 2.24, que quando cheio recebe um jato submerso a partir de um bocal cônico de 0,254 m de diâmetro que reduz para 0,064 m em um comprimento de 0,508 m. Esta redução no diâmetro acelera o escoamento e ajuda a uniformizar a distribuição da velocidade. Peixes são introduzidos por um tubo de acrílico posicionado inclinado imediatamente acima do jato em frente a saída do jato, FIGURA 2.25.



FIGURA 2.24 – Vista geral do reservatório e do canal em fibra de vidro utilizado nos testes de cisalhamento.

FONTE –Guensch *et al.* (2002) – http://www.ornl.gov/~webworks/cpr/pres/108013_.pdf

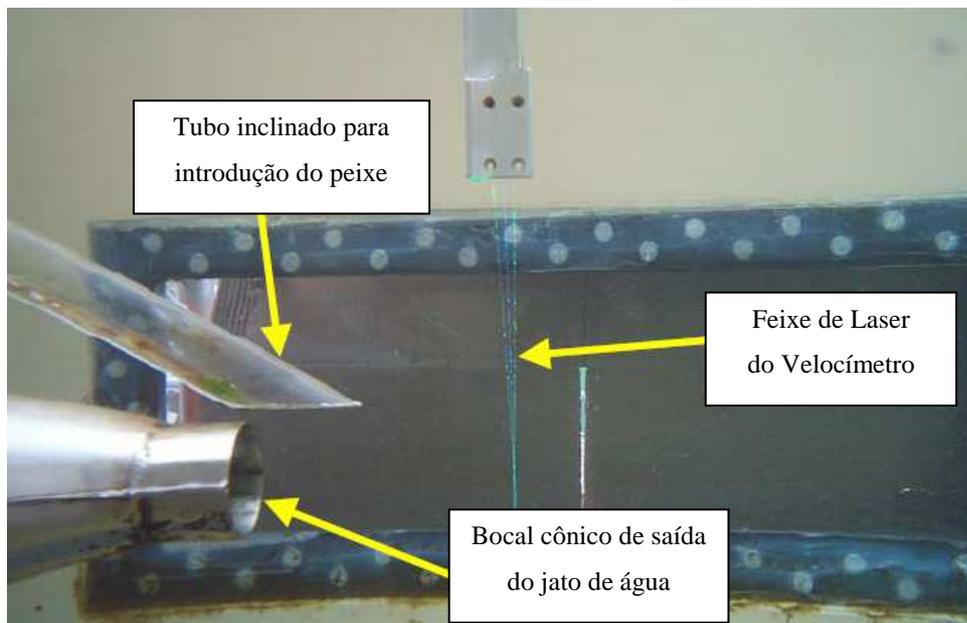
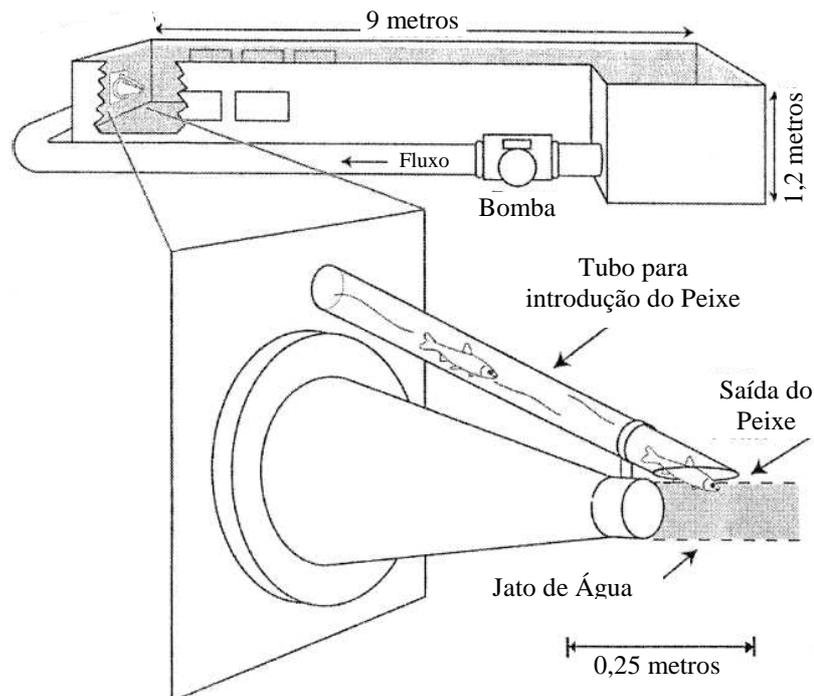


FIGURA 2.25 – Esquema geral de funcionamento do aparato de testes e foto do aparato mostrando o bocal cônico, o tubo inclinado para introdução dos peixes e uma das janelas laterais para observação.

FONTE– Adaptado de Guensch *et al.* (2002) http://www.ornl.gov/~webworks/cpr/pres/108013_.pdf

Uma bomba com capacidade de $15,7 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (9.464 l/min), (Neitzel et al., 2004), controlada por um inversor de frequência é utilizada para fazer circular a água entre o reservatório e o canal de testes. Este sistema tem a capacidade de gerar velocidade de até 20 m/s. O momento em que os peixes são introduzidos no sistema é filmado por uma câmera de alta velocidade (500 quadros/ segundo) para a posterior observação detalhada dos danos causados, FIGURA 2.26. Os peixes foram testados entrando tanto de cabeça quanto de cauda, sendo a primeira muito mais prejudicial por causar a abertura dos opérculos.

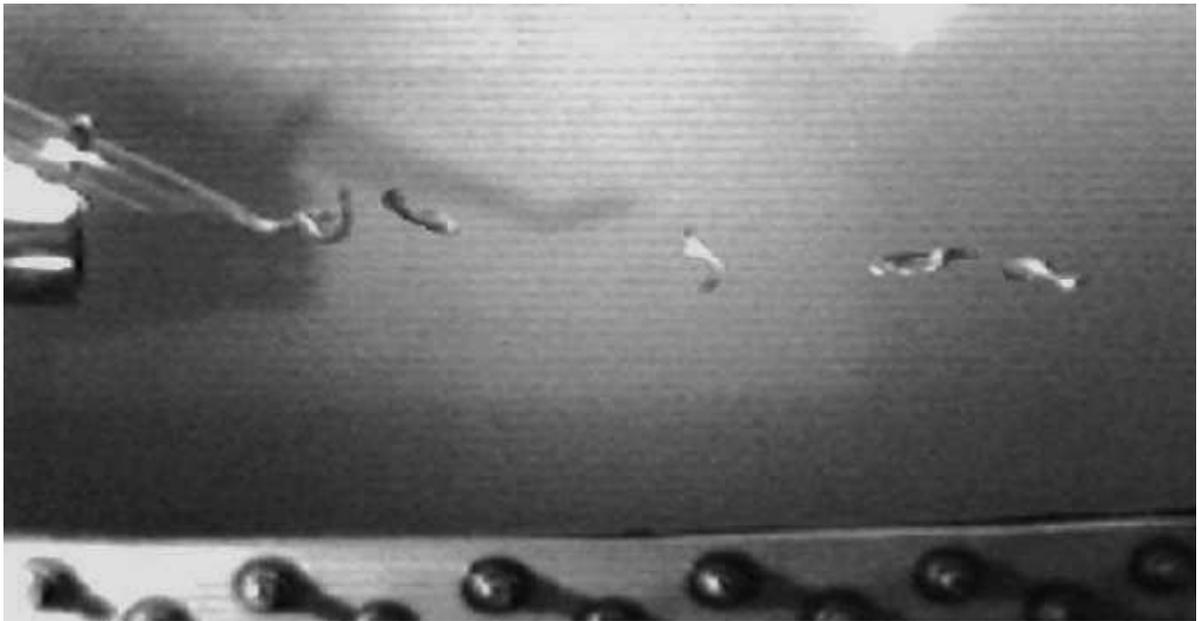


FIGURA 2.26 – Detalhe da filmagem no momento do teste de cisalhamento.
 FONTE – Guensch *et al.* (2002).

2.8. A avaliação dos efeitos das variáveis hidráulicas nos peixes

2.8.1. Avaliação dos danos diretos

2.8.1.1. Observação externa

A doença das bolhas de ar pode ocorrer em uma grande variedade de organismos aquáticos, embora as ocorrências e os sintomas mais amplamente descritos na literatura se referem às espécies de maior importância econômica. Segundo Fidler e Miller (1994), os principais sintomas que podem levar à morte ou altos índices de estresse em decorrência da formação de bolhas no organismo dos peixes são:

- Formação de bolhas de ar no sistema cardiovascular, causando o bloqueio do fluxo sanguíneo e morte (Jensen, 1980; Weitkamp e Katz, 1980; Fidler, 1988).
- Expansão extrema e possível ruptura da bexiga natatória, principalmente em peixes jovens (ou pequenos) causando morte ou problemas relacionados a alterações na flutuação (Shirahata, 1966; Jensen, 1980; Fidler, 1988; Shrimpton *et al.*, 1990).
- Formação de bolhas nos filamentos branquiais, principalmente em peixes maiores ou na cavidade bucal de peixes menores, levando ao bloqueio da entrada de água durante a respiração e morte por asfixia (Fidler, 1988; Jensen, 1988).

· Enfisema sub-dermal ao longo da superfície do corpo inclusive na região da boca. Erupções cutâneas na região da cabeça também podem contribuir para o bloqueio da entrada de água e morte por asfixia (Fidler, 1988; White *et al.*, 1991).

Ainda segundo Fidler e Miller (1994), outros sinais característicos relacionados à doença das bolhas de ar incluem exoftalmia e danos oculares, redução na capacidade natatória, alteração na química do sangue e redução do crescimento (Jensen, 1988). Tais efeitos são capazes de comprometer a sobrevivência dos peixes expostos à supersaturação por longos períodos.

Cada sintoma da “doença das bolhas” ocorre em decorrência do crescimento de bolhas de ar interna ou externamente no organismo dos peixes. Para cada tipo de sintoma existe uma correspondente variação de pressão (ΔP), que deve ser excedido para a formação da bolha ou para que a expansão excessiva da bexiga natatória ocorra (Fidler, 1988). Entretanto, não existe uma relação direta entre causas e efeitos para a ocorrência de “doença das bolhas”. Isto acontece porque as bolhas podem se formar no organismo dos peixes em diversos tipos de compartimentos do corpo do animal, alterando funções neurológicas, cardiovasculares, respiratórias, osmo-regulatórias, e outras funções fisiológicas (Weitkamp e Katz, 1980; Fidler, 1988). Sendo assim, dependendo da intensidade dos danos causados pela doença poderão aparecer diferentes sintomas nos peixes afetados. A “doença das bolhas de ar” pode aumentar a susceptibilidade dos indivíduos afetados à infecção tanto por bactéria, vírus ou fungos (Weitkamp e Katz 1980). De maneira geral, todos os sintomas da doença enfraquecem os peixes, e principalmente nos primeiros estágios de vida do animal, leva ao aumento da susceptibilidade à predação (White *et al.* 1991). Consequentemente, a mortalidade pode ser resultado de várias causas, diretas e indiretas, decorrentes dos efeitos da “doença das bolhas de ar” no organismo dos peixes.

Para salmões juvenis, o primeiro sinal externo da “doença das bolhas de ar” é o aparecimento de bolhas muito pequenas ao longo da linha lateral. O sintoma mais pertinente corresponde ao aparecimento de bolhas nos vasos sanguíneos da brânquia. Outros dois sintomas comuns em salmões juvenis são bolhas ou erupções sob a pele, particular nos raios das nadadeiras, assim como perceptíveis comportamentos anormais. Os salmões adultos podem mostrar sintomas similares e frequentemente desenvolver as bolhas do gás na parte superior da cavidade bucal, FIGURA 2.27.

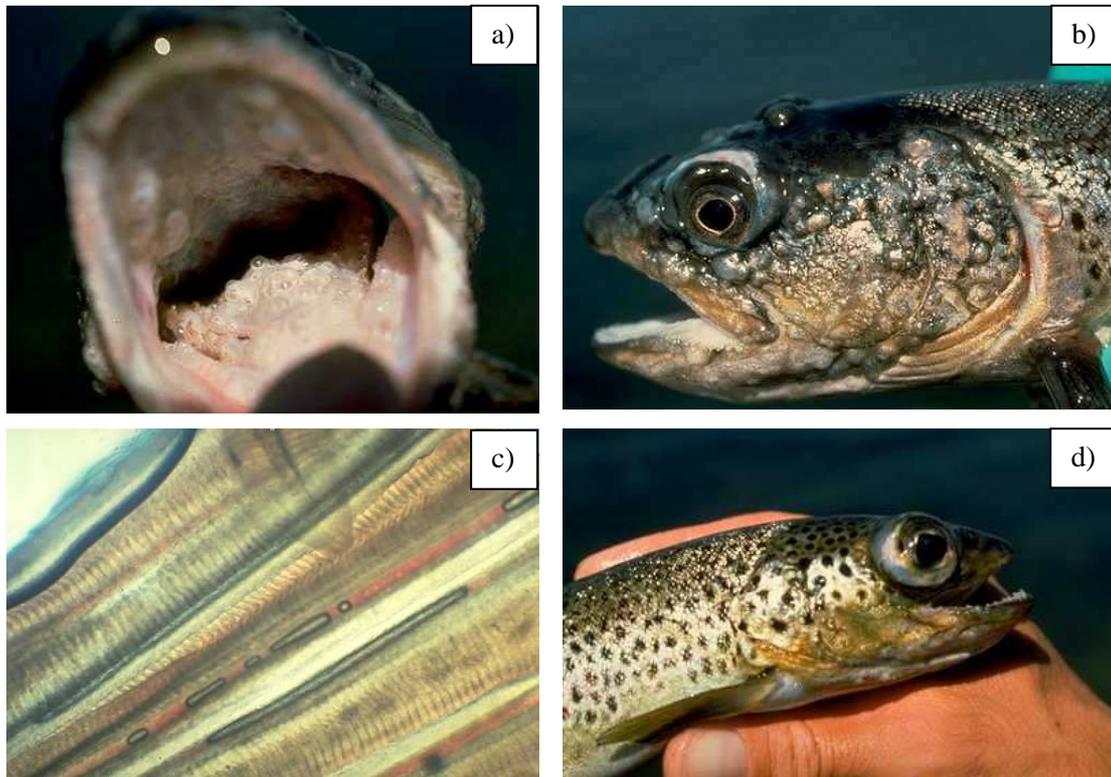


FIGURA 2.27 – a) erupção de bolhas na cavidade bucal de trutas adultas, b) enfisema sub-dermal na superfície externa da cabeça c) imagem microscópica dos filamentos das brânquias obstruídas por gases em um peixe que morreu por “trauma por bolhas de ar” d) exoftalmia extrema em uma truta juvenil.
FONTE – Adaptado de Fidler e Miller (1994).

A FIGURA 2.28 mostra as partes do corpo do peixe onde é comum o aparecimento dos principais sintomas externos em destaque para as brânquias. As brânquias são protegidas por uma estrutura chamada opérculo. Durante a respiração o opérculo se fecha, fazendo com que entre água na boca. A água passa da boca para as brânquias e nelas ocorrem as trocas gasosas. O fluxo é sempre unidirecional. A direção do fluxo sanguíneo nas brânquias é oposto ao fluxo da água, criando um mecanismo contracorrente para aumentar a oxigenação do sangue (Moyle e Cech Jr., 2000).

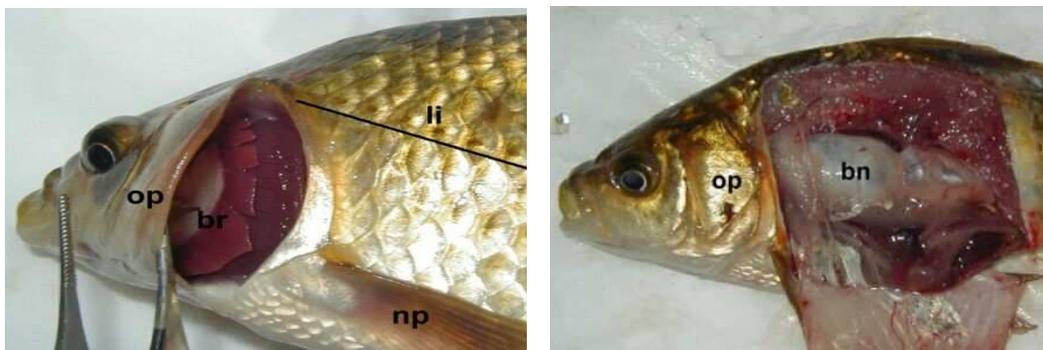


FIGURA 2.28 – Detalhe de partes do organismo dos peixes geralmente afetadas pela doença das bolhas de ar : op- opérculo, br- brânquias, li- linha lateral, np – nadadeira (exemplo, nadadeira peitoral) e bn – bexiga natatória

FONTE - Disponível em <www.nucleodeaprendizagem.com.br/posseo_anat1.jpg>

Na FIGURA 2.29, são apresentados alguns sintomas causados pela formação de bolhas em uma espécie de truta (truta arco-íris) submetida a altos índices de supersaturação de gases dissolvidos.

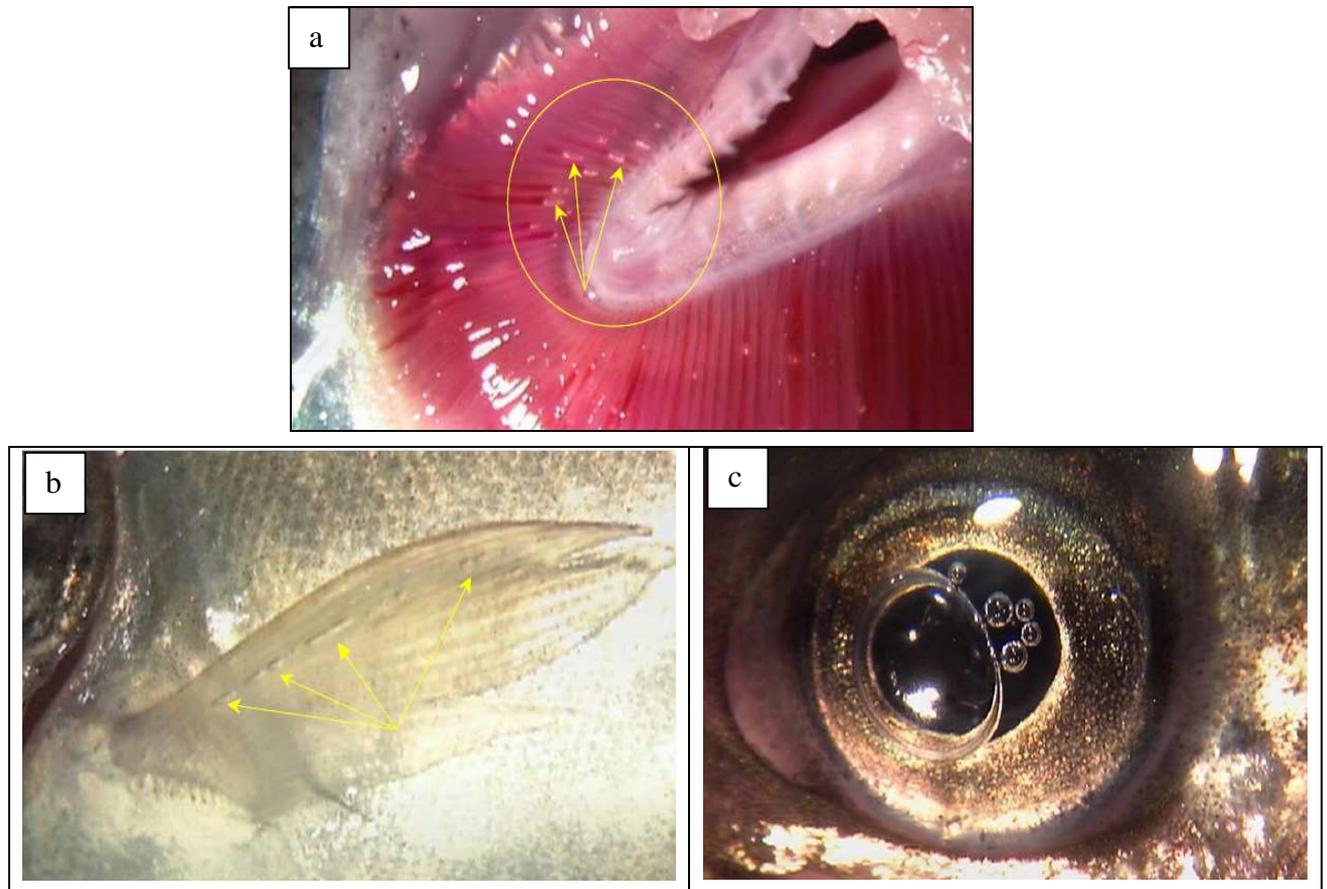


FIGURA 2.29 – a) bolhas nos filamentos da brânquia, b) bolhas na nadadeira peitoral e c) bolhas nos olhos.
 FONTE – Adaptado de Abernethy, 2001

2.8.1.2. Observação interna

Além das observações externas, às vezes são necessárias incisões e dissecações dos peixes testados para identificação dos possíveis danos em tecidos e órgãos internos do peixe, geralmente para a caracterização da formação de bolhas, ruptura ou expansão excessiva da bexiga natatória e hemorragias.

A FIGURA 2.30 mostra a observação da expansão excessiva da bexiga natatória de uma truta após testes de pressão e, na FIGURA 2.31, são identificados os sintomas da “doença das bolhas” em um salmão submetido a testes e pressão e supersaturação.

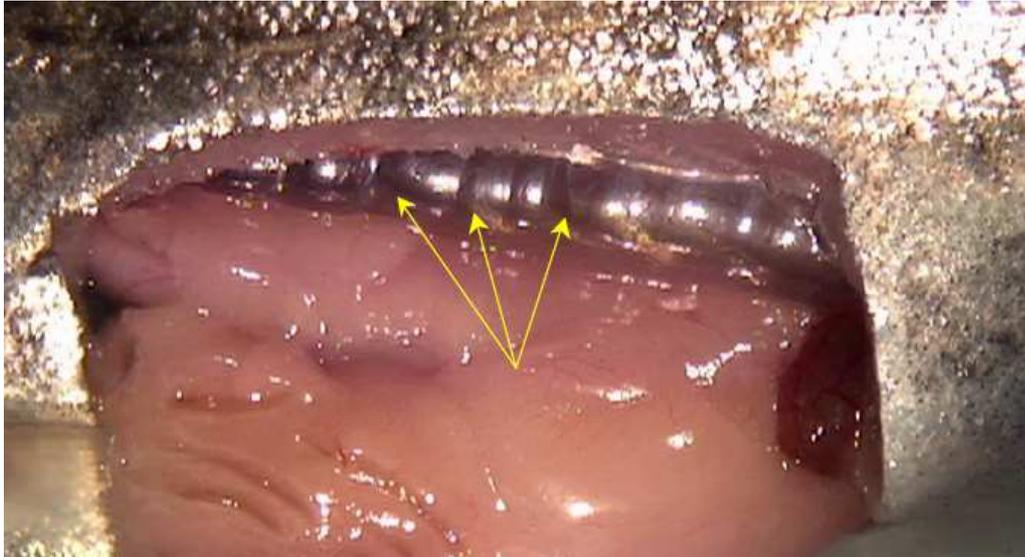


FIGURA 2.30 – Expansão excessiva da bexiga natatória de uma truta 48 horas após o teste de descompressão.
FONTE – Abernethy *et al.*, 2001.

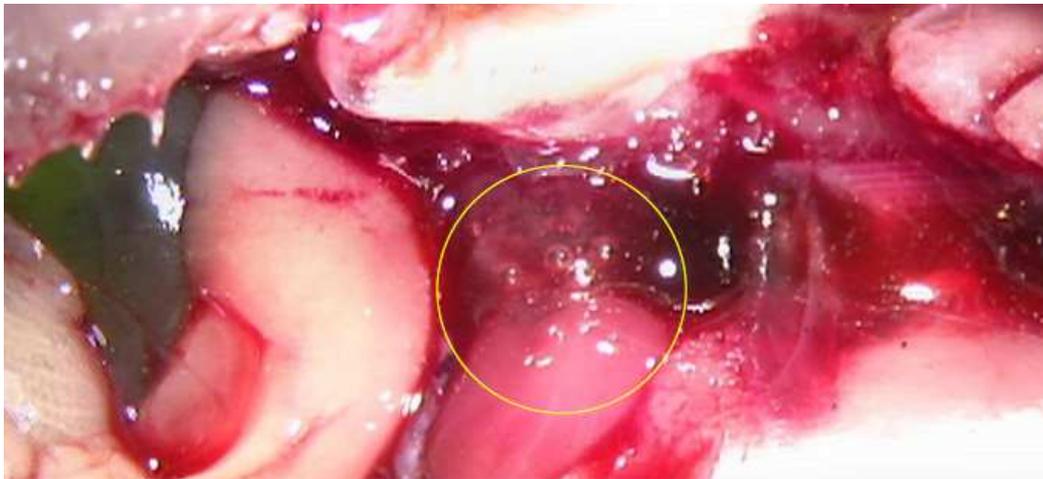


FIGURA 2.31 – Acumulação de bolhas de ar no átrio de um salmão após testes de descompressão sobre efeito de supersaturação.
FONTE – Abernethy *et al.*, 2001.

2.8.2. Avaliação dos danos indiretos

2.8.2.1. Teste de reação

Existe uma vasta literatura que descreve estudos sobre a reação do peixe utilizando sua mais intensa energia, reação esta conhecida como comportamento de resposta rápida “*fast-start*” ou respostas iniciais “*startle responses*”. Durante este movimento brusco de reação acredita-se que o peixe utilize a chamada velocidade de explosão, geralmente empregada na captura de presas ou na fuga de predadores, ou outras situações extremas.

Segundo a metodologia desenvolvida por Eaton *et al.* (1977), este movimento comportamental é geralmente empregado para a avaliação da resposta de escape de peixes teleósteos por apresentarem um estereótipo marcante e por envolver o “acionamento” de todas as unidades motoras, incluindo todas as fibras de movimentos rápidos (*the fast twitch fibres*).

O comportamento de “resposta rápida”, conforme mostrado na FIGURA 2.32, consiste basicamente em 2 (dois) estágios,:

1. O peixe dobra em um formato em “C” (“*C-Start*”), como o movimento resultante da contração simultânea de todas as fibras dos músculos presentes em um lado do corpo do peixe;
2. O segundo estágio consiste no movimento que resulta no “S – *Shaped*” formato em S, que é responsável pelo “arranque propulsor” (*propulsive shoke*) geralmente em direção oposta a do estágio 1.

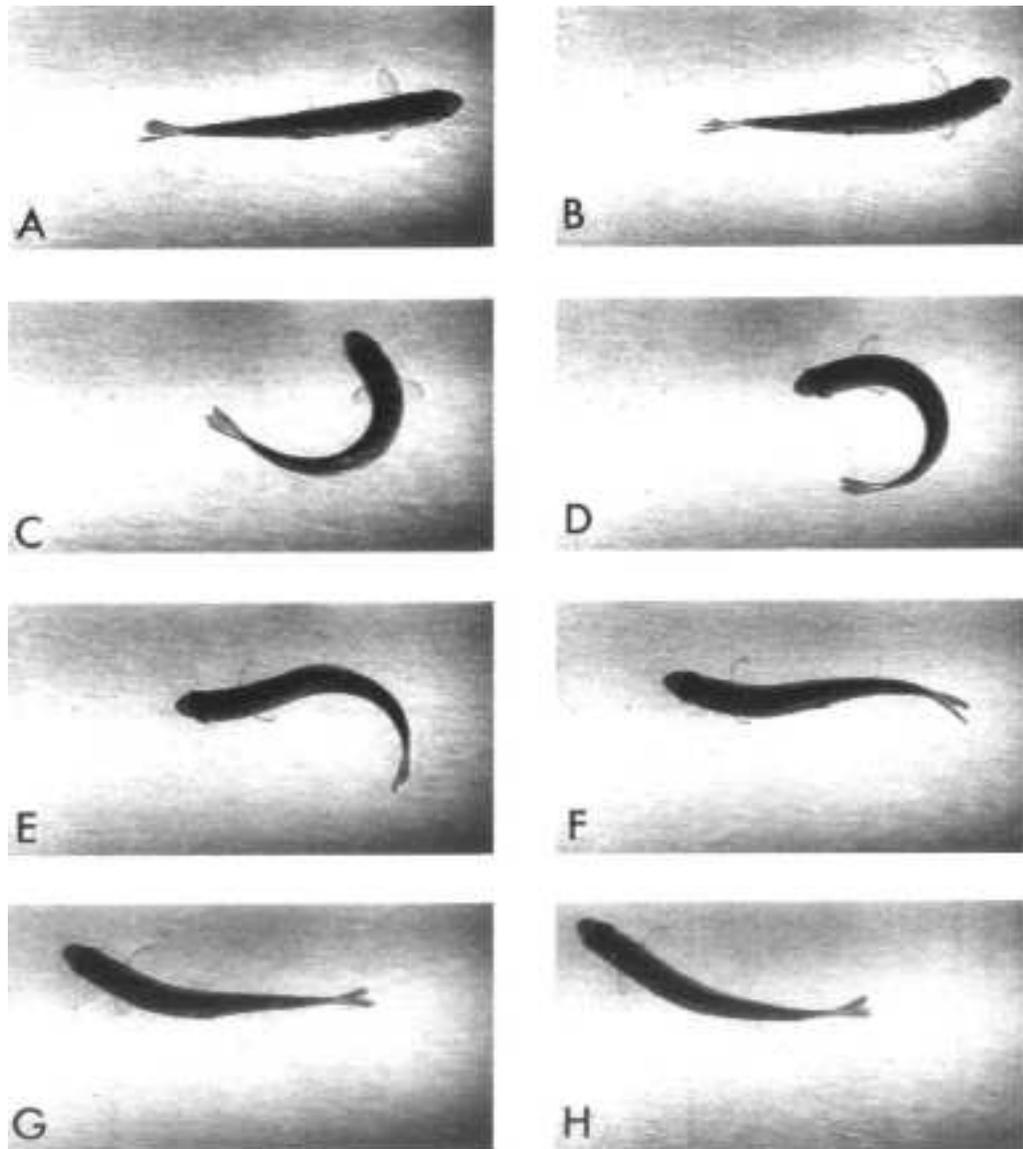


FIGURA 2.32 – A reação em “c” ou “reação –rápida” ou “começo rápido” de um salmão. De A a H é mostrado como se processo o movimento, sendo que de A a C é mostrado o estágio 1 de reação e de D a F caracteriza-se pelo estágio 2. O final do estágio 2 ocorre quando a cauda alcança sua amplitude máxima para o lado oposto do corpo na flexão inicial (H).

FONTE : Adaptado de Hale (1996).

Diferentes pesquisas com peixes teleósteos utilizam o padrão da resposta em C para avaliar as condições dos peixes antes e depois de algum experimento (Gibb *et al* 2005; Dominice e Blake, 1997; Hale, 1996). Além de estímulo, como regimes turbulentos, também são conhecidos os testes de adaptação a mudanças de temperatura (*Thermal Acclimation*) (Zottole *et al.*, 1992; Johnson e Bennett, 1995; Batty *et al.*, 1993). Geralmente, para a avaliação é necessária a filmagem do movimento por câmeras de alta velocidade capazes de capturar o rápido movimento de reação com pelo menos 125 quadros por segundo, FIGURA 2.33.

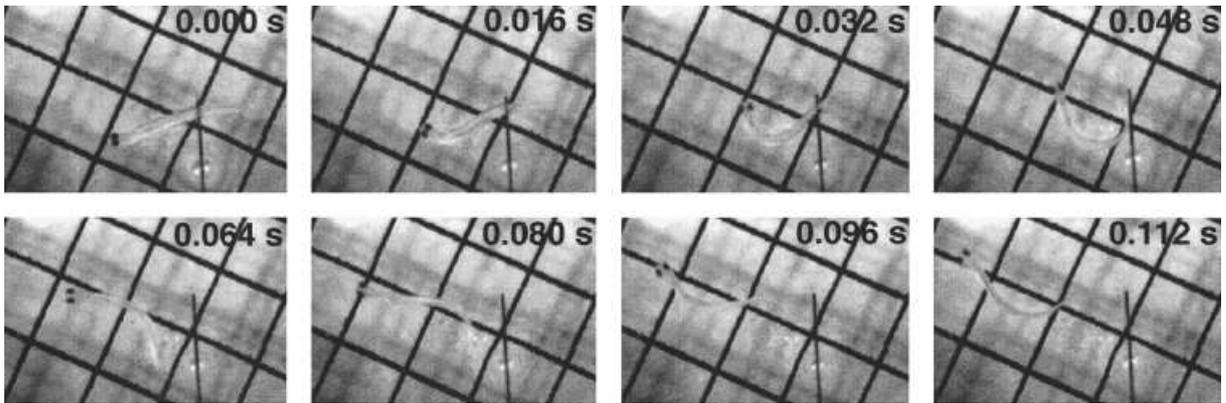


FIGURA 2.33 – A reação em “c” ou “reação –rápida” capturada por filmagem em alta velocidade de aquisição.
FONTE : Adaptado de Gibb *et al.* (2005).

Outros métodos para a avaliação dos danos indiretos incluem testes de reação à predação, FIGURA 2.34, e avaliação da capacidade natatória antes e depois de submetidos a alguma variável que cause estresse.



FIGURA 2.34– Teste de reação com predador
FONTE : Adaptado de Cada *et al.* (2003).

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve os aparatos experimentais construídos e as metodologias utilizadas para a caracterização de efeitos diretos e indiretos causados em duas espécies de peixes por variação brusca de pressão e permanência em condições de turbulência.

3.1. Espécies testadas

A espécie *Pimelodus maculatus* (mandi-amarelo) foi previamente selecionada. Optou-se por iniciar os estudos com o mandi-amarelo por ser esta uma espécie que vem sofrendo grande mortalidade junto às centrais hidrelétricas (AmbienteBrasil, 2007), principalmente em decorrência de paradas de máquinas para manutenção. A importância do estudo dessa espécie também reside no fato de ser abundante nos rios brasileiros e apresentar comportamento migratório.

O mandi-amarelo é uma espécie de peixe de couro da família Pimelodidae, uma das principais famílias da ordem dos siluriformes, e de ampla distribuição geográfica nas bacias hidrográficas do rio São Francisco e Paraná (Lundeberg & Littmann 2003), sendo conhecido vulgarmente como: mandiguçu, mandiu, mandi-pintado, pintado, pintadinho, bagre-pintado, entre outros nomes, dependendo da região (Santos, 1987). É o maior dos mandis, podendo chegar a exemplares entre 30 a 40 cm de comprimento (Britski *et al.*, 1988; Andrade & Braga, 2005) e pesar até 3kg.

Como a maioria dos peixes de couro, o mandi-amarelo vive no fundo dos ambientes aquáticos, procurando águas turvas. Quanto à reprodução, seu comprimento na primeira maturação varia entre 12,5 a 18,0 cm para machos e 12,0 a 19,0 cm para fêmeas. Sua alimentação é basicamente composta por larvas bentônicas de insetos, algas, moluscos, peixes e fragmentos de vegetais, sendo onívoro (CEMIG-CETEC, 2000).

A detecção do alimento por esta espécie é auxiliada pela presença de dois pares de barbilhões maxilares (Alves & Pompeu, 2001), uma estrutura de tato do substrato e de auxílio a seus hábitos noturnos. Possui ferrões nas nadadeiras laterais e dorsal. Apresenta pele amarelada, pintas escuras e ventre branco, conforme mostrado na FIGURA 3.1.



FIGURA 3.1 - *Pimelodus maculatus* (nome popular: mandi-amarelo)

Além do *Pimelodus maculatus* também foram realizados testes com o *Astyanax bimaculatus* (lambari-do-rabo-amarelo) com o intuito de comparar os resultados obtidos nos testes de pressão e turbulência para duas ordens distintas (Siluriformes e Characiformes) de grande representatividade nas bacias brasileiras. A FIGURA 3.2 mostra um exemplar do *A.bimaculatus* testado.



FIGURA 3.2 – *Astyanax bimaculatus* (nome popular: lambari-do-rabo-amarelo)

3.2. Transporte e manutenção dos peixes em laboratório

Uma etapa complexa deste trabalho consistiu no manejo e manutenção de indivíduos oriundos de habitat naturais dentro do laboratório. As dificuldades estão relacionadas à tentativa de manutenção das características naturais dos indivíduos capturados e redução dos efeitos do estresse ligados à captura e ao transporte.

Com o intuito de garantir adequadas condições de sobrevivência dos peixes utilizados nos testes, foram desenvolvidos no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG (CPH-UFMG) aparatos para o sistema de manutenção, FIGURA 3.3. Estes aparatos foram constituídos basicamente de grandes tanques, que através de sistemas hidráulicos, permitiram a recirculação de água, de forma a minimizar a perda da capacidade natatória dos peixes, mantendo-os em atividade.



FIGURA 3.3 - Aparato desenvolvido no CPH para a manutenção dos peixes

A FIGURA 3.4 mostra em detalhe as tubulações do sistema hidráulico instalado para promover um padrão de escoamento circular no interior dos tanques com velocidades médias em torno de 0,5 a 1,0 m/s.

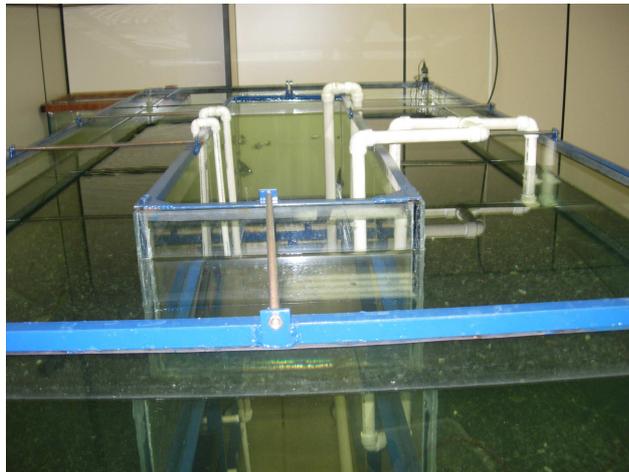


FIGURA 3.4 – Sistema de recirculação da água do aparato.

Os aparatos desenvolvidos contaram com sistemas de filtragem, que retira impurezas por filtragem física e biológica melhorando também a oxigenação da água, FIGURA 3.5. Carvão ativado e partículas de materiais cerâmicos e porosos nos filtros, além de sistema de esterilização ultra violeta (UV), foram instalados para o tratamento dos tanques. Os tanques

contaram ainda com sistema de aeração auxiliar para assegurar que as taxas de oxigênio dissolvido fiquem em torno do nível de saturação.



FIGURA 3.5 – Caixa do sistema de filtragem dos tanques de manutenção.

Os índices de qualidade da água, tais como níveis de oxigênio dissolvido, pH, temperatura, amônia, nitrato e a presença de cloro foram monitorados semanalmente. Estes dados foram fundamentais para determinar as ações de limpeza dos filtros e a necessidade de renovação da água dos aquários. Tratamentos preventivos contra fungos e bactérias também foram periodicamente realizados nos tanques de manutenção.

Em julho de 2009 concluiu-se a montagem do terceiro tanque para a manutenção dos peixes no laboratório do CPH com capacidade para cerca de 3500 litros de água, conforme mostrado na FIGURA 3.6.



FIGURA 3.6 - Aparato desenvolvido no CPH para a manutenção dos peixes durante processo de montagem.

Para a realização da primeira etapa de testes foram coletados cerca de 200 mandi-amarelos no reservatório de Furnas, próximo à cidade de Areado, Minas Gerais. Os peixes foram previamente capturados em armadilhas do tipo tanque-rede, FIGURA 3.7..

A seguir são listados alguns procedimentos adotados durante a coleta e o transporte dos peixes para o laboratório:

1. Os peixes foram cuidadosamente retirados um a um do tanque-rede, FIGURA 3.8, e imediatamente transferidos para os tanques de transporte (Transfish®)
2. Nos tanques de transporte, com capacidade máxima de 200 litros (suportando cerca de 250 indivíduos), os peixes foram acondicionados em água diretamente retirada do local de captura, FIGURA 3.8;
3. À água dos tanques foram adicionados produtos específicos para condicionamento do transporte (Ph-ease e Ick-Easy Mydor®, Ft. Lauderdale, Florida), que reduzem o estresse e estimulam a produção de muco nos peixes possibilitando uma maior proteção e minimizando o ataque de microorganismos (parasitas, fungos e bactérias) ;
4. Manteve-se ligado, durante todo o transporte, o sistema de aeração dos tanques;
5. Realizaram-se paradas periódicas durante o transporte para o monitoramento dos peixes nos tanques, permitindo uma ação rápida caso ocorresse qualquer eventualidade.



FIGURA 3.7 – Local de coleta de mandi-amarelos no reservatório de FURNAS – Rio Grande- Minas Gerais. Vista dos tanques redes onde são capturados



FIGURA 3.8 – Seleção e acondicionamento dos peixes para o transporte até o laboratório do CPH-UFMG.

3.3. Testes de pressão e descompressão - Aparato vertical

Em 2005, foi construído o primeiro aparato experimental no CPH projetado com o objetivo de avaliar os efeitos da variação de pressão sobre algumas espécies de peixes, conforme descrito por Pompeu *et al.* (2009). Este aparato apresenta as seguintes características principais:

- Suporta uma pressão de trabalho de até 50 metros de coluna d'água;
- Permite o aumento gradual de pressão;
- Proporciona diferentes velocidades de descompressão;
- Permite a descompressão até valores de pressão atmosférica local;

- Permite, a partir das janelas laterais, a visualização e a avaliação do deslocamento dos peixes na coluna d'água durante os experimentos;
- Permite razoável facilidade de introdução e retirada dos peixes do aparato;
- Possibilita a experimentação individual de peixes de até 30 cm de comprimento ou em grupo, quando de tamanhos menores.

A estrutura principal do aparato vertical de pressão foi construída com um tubo de PVC (Policloreto de vinila) com 300 mm de diâmetro, 3000 mm de altura e 30 mm de espessura. Ao longo do tubo foram instaladas 14 janelas de acrílico translúcido com 100 mm de diâmetro e 16 mm de espessura, posicionadas em três fileiras verticais equidistantes. Duas fileiras, com cinco janelas, tiveram como objetivo a visualização dos peixes no interior do aparato, e a terceira, com quatro janelas, permitiu a iluminação através do acionamento opcional de lâmpadas incandescentes externas ao aparato. Nas extremidades do aparato, foram instaladas tampas que permitem a introdução e retirada de peixes, através de registros de gaveta de 4 polegadas de diâmetro. Estas tampas foram usinadas em nylon e aparafusadas no tubo. A tampa superior contém, além do registro, três tubos de cobre que ligam a estrutura principal ao painel de operação. Todo o aparato experimental, bem como os painéis de controle, foram construídos sobre uma estrutura metálica com rodízios, permitindo seu livre deslocamento, FIGURA 3.9.

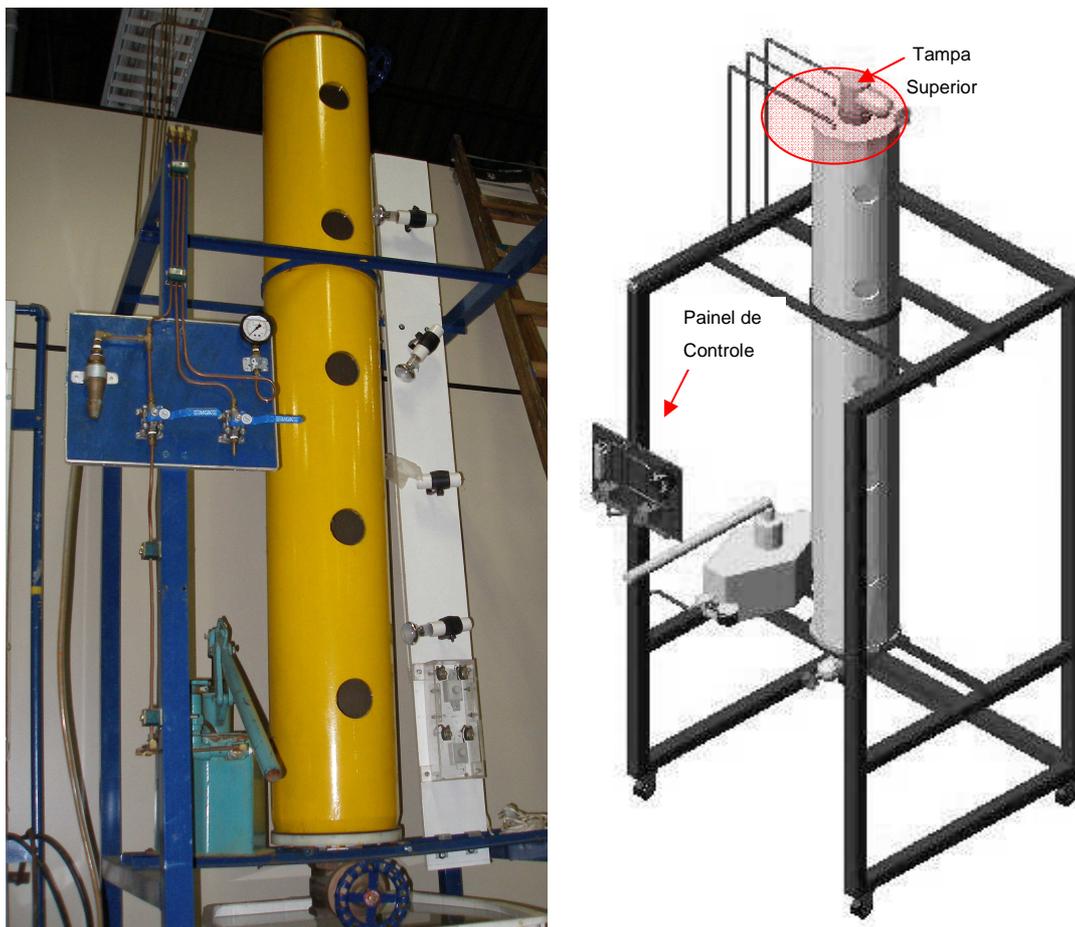


FIGURA 3.9 - Aparato vertical de avaliação dos efeitos de pressão em peixes. Detalhe da tampa superior, sua ligação com o painel de controle e da estrutura metálica de suporte.

Na tampa inferior, sua estrutura interna inclinada evita o aprisionamento dos peixes durante sua retirada do aparato, FIGURA 3.10.

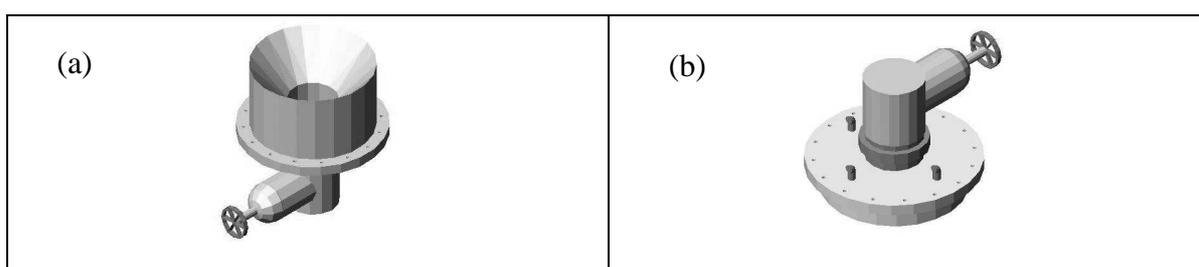


FIGURA 3.10 – Aparato vertical de pressão- detalhe (a) Tampa inferior do aparato e (b) tampa superior do aparato experimental.

O painel de controle do aparato é composto basicamente por três circuitos, que conectados à tampa superior tiveram as seguintes finalidades, FIGURA 3.11:

- Determinação da pressão interna do aparato através de um manômetro de pressão (A);
- Descompressão através da abertura manual da válvula de esfera (B);
- Pressurização do aparato através da conexão com uma bomba manual de pressão;

- Válvula de esfera (C) para evitar perda de pressão através da bomba e válvula de segurança (D).

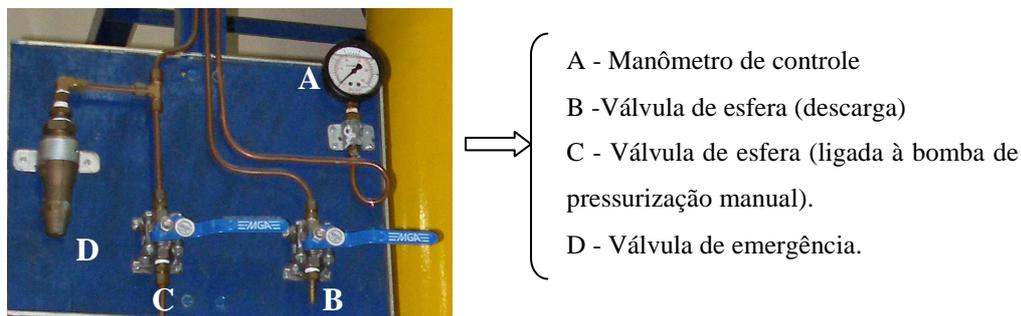


FIGURA 3.11- Painel de controle do aparato experimental de pressão.

Foram realizados testes preliminares para o comissionamento do aparato. O tempo mínimo de pressurização foi medido levando em consideração o acionamento manual da bomba de pressão. Já o tempo de decompressão até a pressão atmosférica foi considerado instantâneo (menor que um segundo) e obtido pela ação de abertura do registro de gaveta da tampa inferior do aparato. A TABELA 3.1 mostra o tempo mínimo para pressurização e decompressão do aparato experimental para as cargas hidráulicas testadas.

TABELA 3.1- Tempo mínimo para pressurização e decompressão do aparato vertical, para duas pressões testadas.

Pressão (mca)	Tempo de Pressurização (s)	Tempo de Decompressão Instantânea (s)
10	7	< 1
50	22	< 1

3.3.1. Escopo experimental - Aparato vertical

Como intuito de avaliar os efeitos causados em mandi-amarelo pela decompressão instantânea a partir de uma determinada pressão, foram estabelecidos dois níveis de aclimatação a serem testados: 10 e 50 m.c.a. Estas pressões de aclimatação foram adotadas por representarem um cenário crítico de pressões possíveis de serem encontradas, à jusante das turbinas de centrais hidrelétricas no canal de fuga e junto a tomada d'água respectivamente, considerando a diferença de pressão existente entre o nível do reservatório e tais estruturas.

Durante o período de maio a setembro de 2007, foram testados um total de 50 mandis- amarelos dos quais 26 peixes a uma pressão de aclimação máxima de 10 m.c.a. e 24 peixes para a pressão de 50 m.c.a. O comprimento total dos indivíduos testados a 10 m.c.a variou de 11,5 a 29,0 cm e de 7,5 a 19,0 cm para 50 m.c.a.

Os peixes foram testados individualmente ou em grupos de até 3 peixes com diferentes tamanhos para possibilitar a observação distinta de cada peixe. O comprimento total médio dos mandis testados, assim como a classificação em três categorias de tamanho, para facilitar identificação durante os testes, são apresentadas na TABELA 3.2 e TABELA 3.3 respectivamente.

TABELA 3.2 – Comprimento total médio dos mandis-amarelos submetidos a testes de pressão máxima de 10 m.c.a e decompressão imediata.

GRUPOS	Comprimento total (cm)		N
	Média	Desvio padrão	
Todos os peixes	18,6	5,1	26
Indivíduos pequenos (<15,0 cm)	13,4	1,0	7
Indivíduos médios (15,0 cm – 20,0 cm)	16,2	1,3	9
Indivíduos grandes (>20,0 cm)	24,3	2,5	10

TABELA 3.3 – Comprimento total médio dos mandis-amarelos submetidos a testes de pressão máxima de 50 m.c.a e decompressão imediata.

GRUPOS	Comprimento total (cm)		N
	Média	Desvio padrão	
Todos os peixes	11,8	3,1	24
Indivíduos pequenos (<15,0 cm)	10,9	2,0	21
Indivíduos médios (15,0 cm – 20,0 cm)	17,8	2,0	3

De cada exemplar capturado, registraram-se comprimento total (CT), comprimento padrão (CP), peso corporal (PC). O GRÁFICO 3.1. apresenta o comprimento total em relação ao peso corporal dos mandis-amarelos testados no aparato vertical.

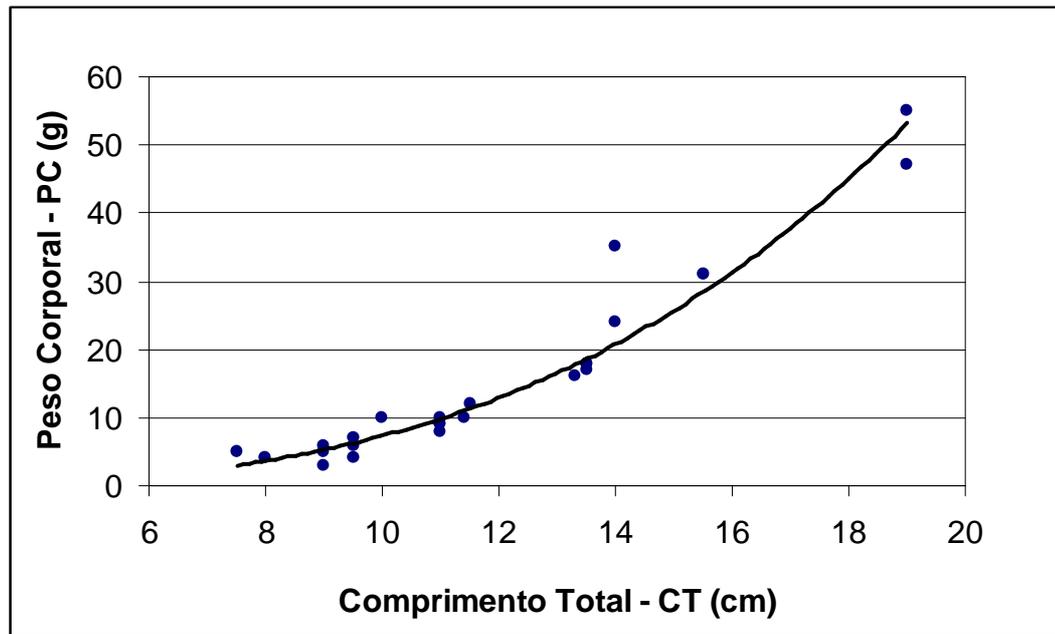


GRÁFICO 3.1 – Relação entre o comprimento total e peso corporal dos mandis-amarelos testados no aparato vertical

Para observação da posição dos indivíduos durante o ensaio e facilitar a análise dos resultados o aparato foi dividido em cinco níveis conforme mostrado na FIGURA 3.12.

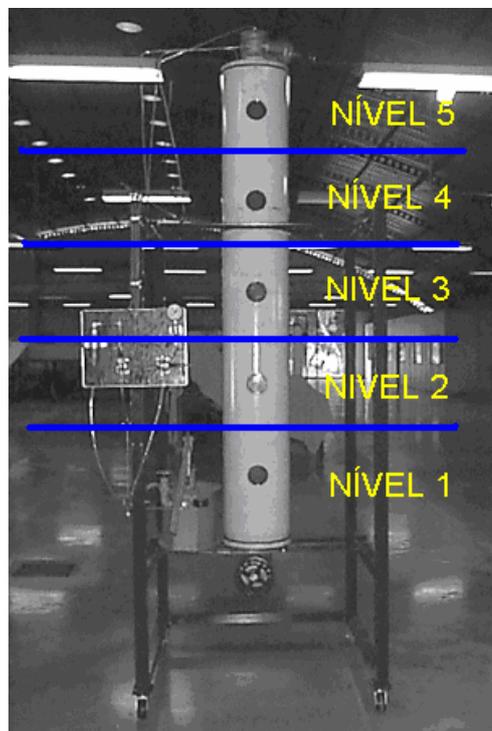


FIGURA 3.12 – Divisão do aparato em níveis de observação

Os testes realizados com o aparato vertical seguiu-se resumidamente o seguinte protocolo experimental:

1. Seleção, a partir do tanque de manutenção, e realização da biometria dos peixes a serem testados;
2. Acondicionamento durante 30 minutos em aquário de observação e registro das características iniciais de cada indivíduo;
3. Inserção dos indivíduos no aparato;
4. Observação e registro da distribuição longitudinal (5 níveis) dos peixes no interior do aparato durante período de aclimatação (10 minutos);
5. Pressurização do aparato até o nível desejado (10 ou 50 m.c.a) a uma taxa de 10 m.c.a por minuto com observação e registro da distribuição longitudinal dos peixes na condição pressurizada (uma observação por minuto);
6. Realização do procedimento de descompressão pela abertura da válvula;
7. Retirada imediata dos indivíduos;
8. Acondicionamento dos indivíduos testados em aquários de observação;
9. Avaliação e registro das características de cada peixe nos intervalos de 0, 1, 24, 48, 72 e 96 horas após o teste.

As observações realizadas nos períodos pré e pós-teste foram classificadas em cinco categorias: morte, ocorrência de fungos, reação alterada, hemorragia (identificável externamente) e outros traumas (e.g. quebra de ferrões, lesões na pele e barbilhões). Os resultados dos testes com mandis, utilizando-se o aparato vertical para duas condições iniciais de pressurizações (10 e 50 m.c.a) seguidas de despressurização instantânea, são apresentados no Capítulo 4.

3.4. Testes de pressão e descompressão - Aparato horizontal

Em 2008, foi projetado e construído um novo aparato de testes, contemplando importantes modificações conceituais quando comparado ao primeiro aparato de pressão vertical. A principal diferença entre os dois aparatos projetados reside na faixa de operação de pressão. O novo aparato (horizontal) foi projetado para uma pressão máxima de 100 m.c.a, além de permitir a descompressão instantânea (em menos de 1 segundo) até valores menores do que a pressão atmosférica (cerca de 0,2 atm – em pressão absoluta). A possibilidade de simular variações de pressão abaixo da pressão atmosférica apresenta-se como uma grande vantagem

em relação ao primeiro aparato, pois, conforme descrito no capítulo 2, estas são condições possíveis de ocorrer logo à jusante do rotor da turbina e na saída de tubo de sucção.

Podem-se destacar como características e principais vantagens do segundo aparato (horizontal) construído para os testes de pressão e descompressão os seguintes itens:

- O aparato permite um maior controle na aplicação de diferentes gradientes de pressão, pois dispõe de sensores de pressão e sistema de aquisição de dados;
- O arranjo do aparato facilita a inserção e remoção de peixes dentro do equipamento;
- A seção de testes em acrílico translúcido e o confinamento do peixe testado permitem o monitoramento visual e registro em vídeo de todo o teste. O novo aparato foi projetado para realizar testes com apenas um indivíduo por vez.
- O comando de abertura e fechamento das válvulas é elétrico, portanto mais fácil de ser operado;
- O sistema é capaz de realizar a simulação de pressões as quais os peixes são submetidos durante seu trajeto por diferentes tipos de turbinas e configurações de usinas, atendendo assim, às necessidades de verificação dos efeitos para diferentes gradientes de pressão, inclusive a simulação de pressões negativas aplicadas aos indivíduos.

Uma vista geral do aparato horizontal para testes de pressão e descompressão pode ser visualizado na FIGURA 3.13.

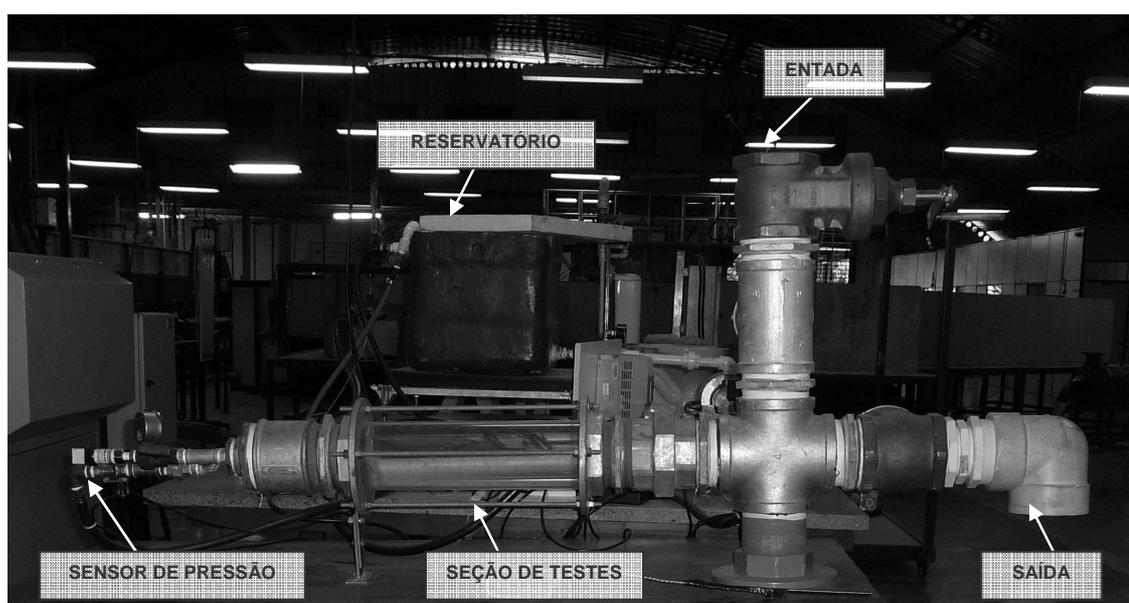


FIGURA 3.13 – Vista do aparato horizontal de pressão destacando a seção de teste em acrílico.

O aparato funciona em circuito fechado, permitindo o fluxo de água a partir do reservatório até a área de teste e vice versa. Utilizou-se uma bomba de sete estágios Dancor® com altura manométrica máxima de 200 m.c.a. acoplada a um motor de 3 cv. A velocidade de rotação da bomba e conseqüentemente os níveis de pressão aplicados ao sistema são controlados por um inversor de frequência. O sistema ainda conta com quatro válvulas solenóides de ½ polegada, dois manômetros analógicos, um manovacuômetro analógico, dois sensores de pressão, mangueiras de alta pressão e um reservatório com capacidade para cerca de 50 litros. A seção de testes é constituída por um tubo de acrílico de 100 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento, montado na horizontal e acoplado ao restante do sistema através de flanges e 4 barras rosqueadas, permitindo o ajuste da vedação. O acionamento das válvulas solenóides é realizado a partir de uma central de comandos, que possibilita diversas configurações para a abertura ou fechamento. A jusante da área de teste foi instalada uma válvula solenóide que, ao ser fechada, permite o aumento da pressão no interior da câmara de teste, FIGURA 3.14.



FIGURA 3.14 – Vista do aparato horizontal de pressão destacando a seção de teste em acrílico.

O aparato foi projetado para permitir o acréscimo de pressão gradual e a decompressão instantânea podendo atingir valores negativos de pressão relativa (0,2 atm de pressão absoluta). Para o monitoramento em tempo real das variações de pressão, assim como o armazenamento das simulações de pressão realizadas, foi instalado um sistema de aquisição de dados, FIGURA 3.15, composto por:

- 2 transdutores de pressão – um à montante e outro à jusante da seção de teste (faixa de medição -1 bar a +10 bar e saída 4-20 mA);
- 1 fonte de alimentação de 20V;
- 1 módulo de aquisição de dados com saída USB (*National Instruments* - mod NI USB-6008 que utiliza LabVIEW (VI LOGGER) como *software*);
- 1 computador portátil Toshiba com processador AMD.

O aparato foi comissionado para testes com o aumento de pressão e posterior decompressão imediata para a menor pressão alcançada pelo sistema. Foram levantados os valores de velocidade de rotação da bomba correspondentes para cada pressão no interior da área de testes. Uma série de testes sem peixes foram realizados para verificar a repetibilidade das simulações para o aumento de pressão até 30 m.c.a. e 50 m.c.a. e decompressão até -4 m.c.a. e -8 m.c.a. máxima.

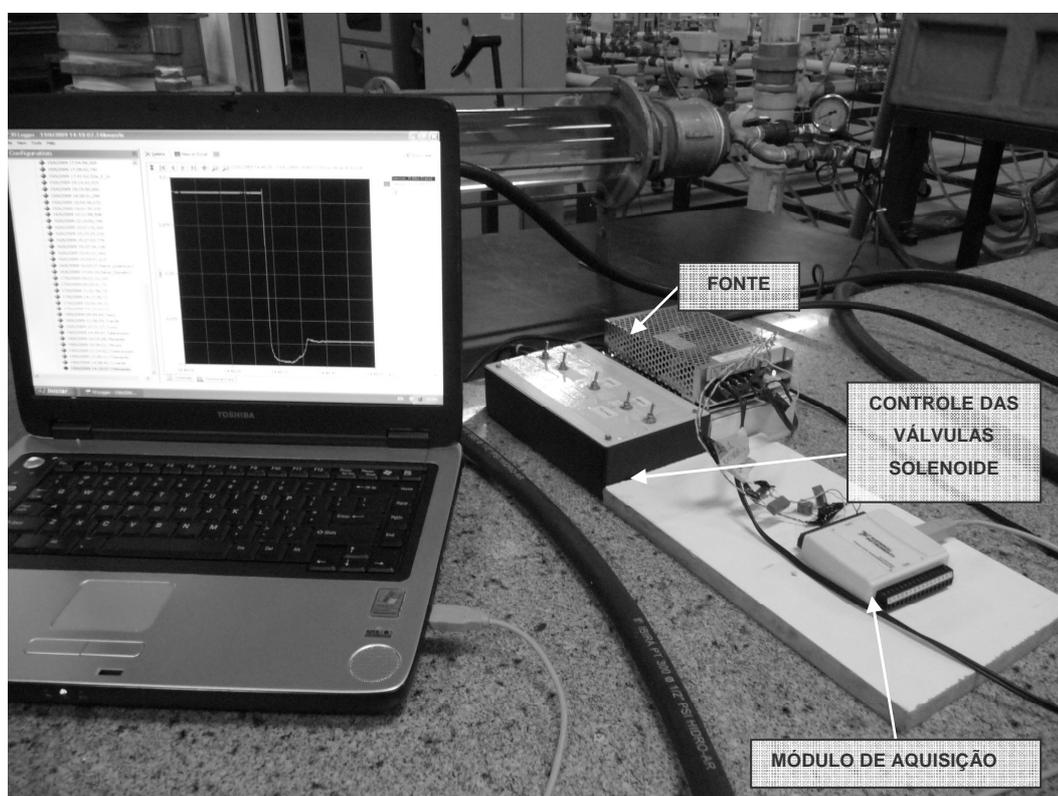


FIGURA 3.15 – Sistema de aquisição de dados de pressão

O GRÁFICO 3.2 apresenta o resultado do comissionamento para o qual a taxa de descompressão máxima se manteve constante.

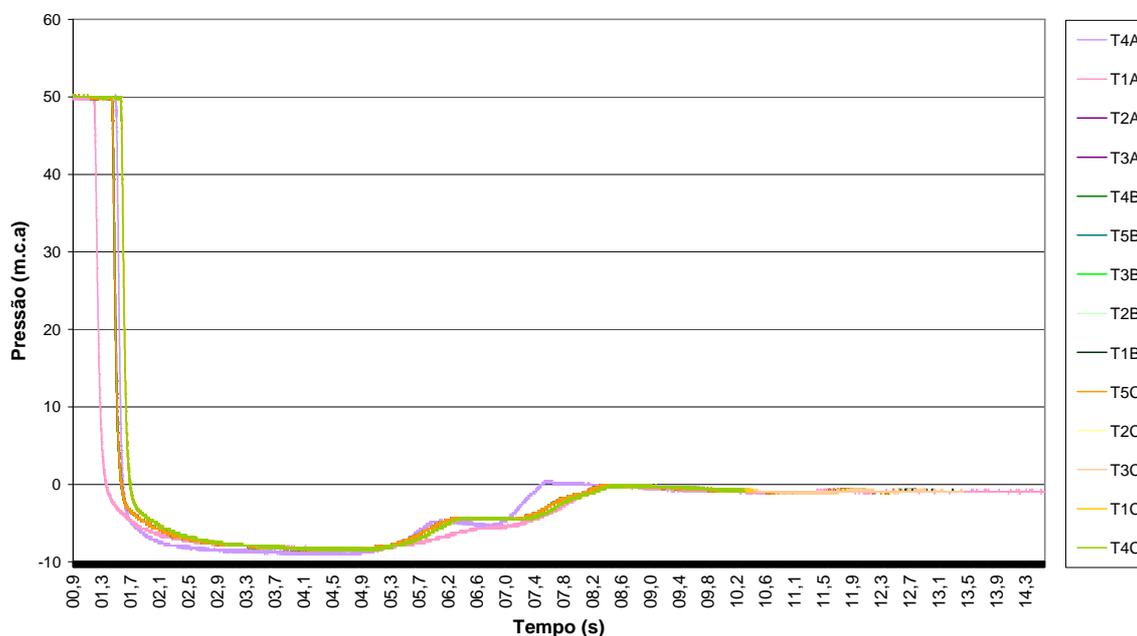


GRÁFICO 3.2 – Resultado do comissionamento do aparato horizontal de pressão e sua repetibilidade para os testes de três baterias (A,B e C).

3.4.1. Metodologia dos testes de variação de pressão no aparato horizontal

A partir das informações levantadas pela revisão bibliográfica realizada, definiu-se uma metodologia de testes para a simulação de possíveis cenários de variações de pressão aos quais os peixes são submetidos ao passarem por turbinas durante a transposição de montante para jusante.

Durante os testes com o aparato horizontal foram estudados dois cenários de variação de pressão e avaliados os efeitos nos peixes testados, quais sejam: pressurização até 30 e 50 m.c.a e descompressão imediata até o valor máximo de operação do aparato de -8 m.c.a.

A definição dos cenários de variação estudados levaram em consideração a seguinte hipótese de simulação de pressões:

- Os peixes realizam a passagem pela turbina partindo da superfície do reservatório à montante, ou seja, sob condições próximas à pressão atmosférica local e deslocam-se no

sentido descendente em direção à tomada d'água e em seguida ao rotor da turbina onde alcançam valores máximos de pressão.

- Após atingir a pressão máxima os peixes sofrem uma descompressão instantânea até valores de pressão relativa negativa ao passarem pela região abaixo das pás da turbina. Em seguida, ocorre um gradativo aumento da pressão referente à recuperação dada pelo tubo de sucção até valores próximos à atmosférica na saída e no canal de fuga.

Analisando os valores de referência obtidos na bibliografia e as condições de contorno encontradas nos sistemas hidráulicos foram estimadas a variação de pressão e o tempo para a simulação da hipótese acima descrita. O procedimento de testes foi dividido em 5 etapas, conforme descrito na TABELA 3.4.

TABELA 3.4 - Pressão e tempo de permanência ao longo do trajeto de transposição para jusante passando pela turbina

Etapa	Pressão inicial (m.c.a)	Pressão final (m.c.a)	Duração da etapa
Pressurização	Pressão atmosférica	30 ou 50	15min e 25 min (2 m.c.a. por minuto)
Aclimatação permanência na pressão máxima	30 ou 50	30 ou 50	5 min
Transiente na descompressão	30 e 50	-8	< 2 s
Permanência em baixas pressões	-8	-8	< 5 s
Recuperação	Pressões próximas à pressão de vapor da água	Retorno à pressão atmosférica	< 5s

Para a etapa de pressurização, utilizou-se um incremento de pressão (taxa de pressurização) de 2 m.c.a. por minuto. Esta taxa foi definida levando-se em consideração o tempo máximo de permanência do peixe no interior do aparato de 30 minutos. Acredita-se que ao atingir pressões negativas e retornar a pressão atmosférica os peixes testados são mais afetados, assim, mantendo-se a taxa de pressurização constante, procurou-se avaliar principalmente os efeitos da descompressão. Levando em consideração estes parâmetros, foi possível definir o seguinte desenho experimental e seus respectivos procedimentos operacionais:

Os peixes foram testados individualmente em três baterias de teste para cada cenário de variação de pressão. Cada bateria de testes foi composta por dois grupos de peixes: controle e

teste. Foram testados 5 peixes em cada grupo, totalizando 30 indivíduos (15 do grupo controle e 15 do grupo teste) para cada cenário de pressão, TABELA 3.5.

TABELA 3.5 – Número de indivíduos testados em cada cenário de variação de pressão

Cenários		Bateria de testes	Número de indivíduos		Total de peixes por cenário
			Grupo Teste	Grupo Controle	
1	Pressão max :50mca Descompressão :-8mca	1	5	5	30
		2	5	5	
		3	5	5	
2	Pressão max :30mca Descompressão :-8mca	1	5	5	30
		2	5	5	
		3	5	5	

O teste controle consistiu em submeter o indivíduo a todos os procedimentos realizados durante o teste, exceto a exposição à variável a ser experimentada. Os resultados obtidos para este grupo foram importantes para a avaliação da influência do manejo pré e pós-teste nas respostas obtidas com o grupo de testes.

Visando minimizar os efeitos do manejo dos peixes em laboratório, foram tomados os cuidados de se preparar o aparato com antecedência aplicando as seguintes medidas de controle: limpeza do aparato, troca da água de teste, controle da temperatura e monitoramento dos níveis de pH e cloro. Procurou-se ajustar as características da água para níveis o mais próximo possível das características da água onde os peixes foram aclimatados antes dos testes.

A seqüência resumida das etapas do teste no aparato de pressão horizontal é listada abaixo:

1. Transferência de 10 peixes do aquário de manutenção para um dos tanques de aclimação no dia anterior ao teste;
2. Realização da biometria e marcação dos peixes para identificação individual;
3. Acondicionamento no tanque de aclimação por 16 a 24 horas. Durante este período os peixes não foram alimentados;
4. Preparação do aparato e condicionamento da qualidade da água para os testes;
5. Observação e registro das condições externas dos peixes. Encontra-se no Anexo I o formulário com o *check-list* elaborado para direcionar a observação;

6. Inserção de um indivíduo no aparato. A seção de testes foi coberta com um tecido para evitar a interferência no comportamento do peixe em função da movimentação de pessoas ao redor;
7. Preparação do sistema de filmagem;
8. Pressurização até o nível desejado, observação e registro das alterações percebidas no comportamento do peixe dentro da seção testes;
9. Realização da etapa do transiente (descompressão instantânea) com a observação e registro do comportamento do peixe (filmagem);
10. Retirada do indivíduo do aparato;
11. Observação e registros das lesões logo após os testes;
12. Acondicionamento dos peixes no tanque de observação;
13. Observação e registros 1, 24 e 48 horas após o teste. Para o registro das observações será utilizado o mesmo formulário citado no item 2 acima. As observações incluirão o número de mortos e os sinais externos do trauma;
14. Repetição dos procedimentos acima listados para o restante do grupo teste.

3.4.2. Operação do aparato de pressão

A FIGURA 3.16 mostra um arranjo esquemático dos principais componentes do aparato experimental horizontal construído para os testes de pressão.

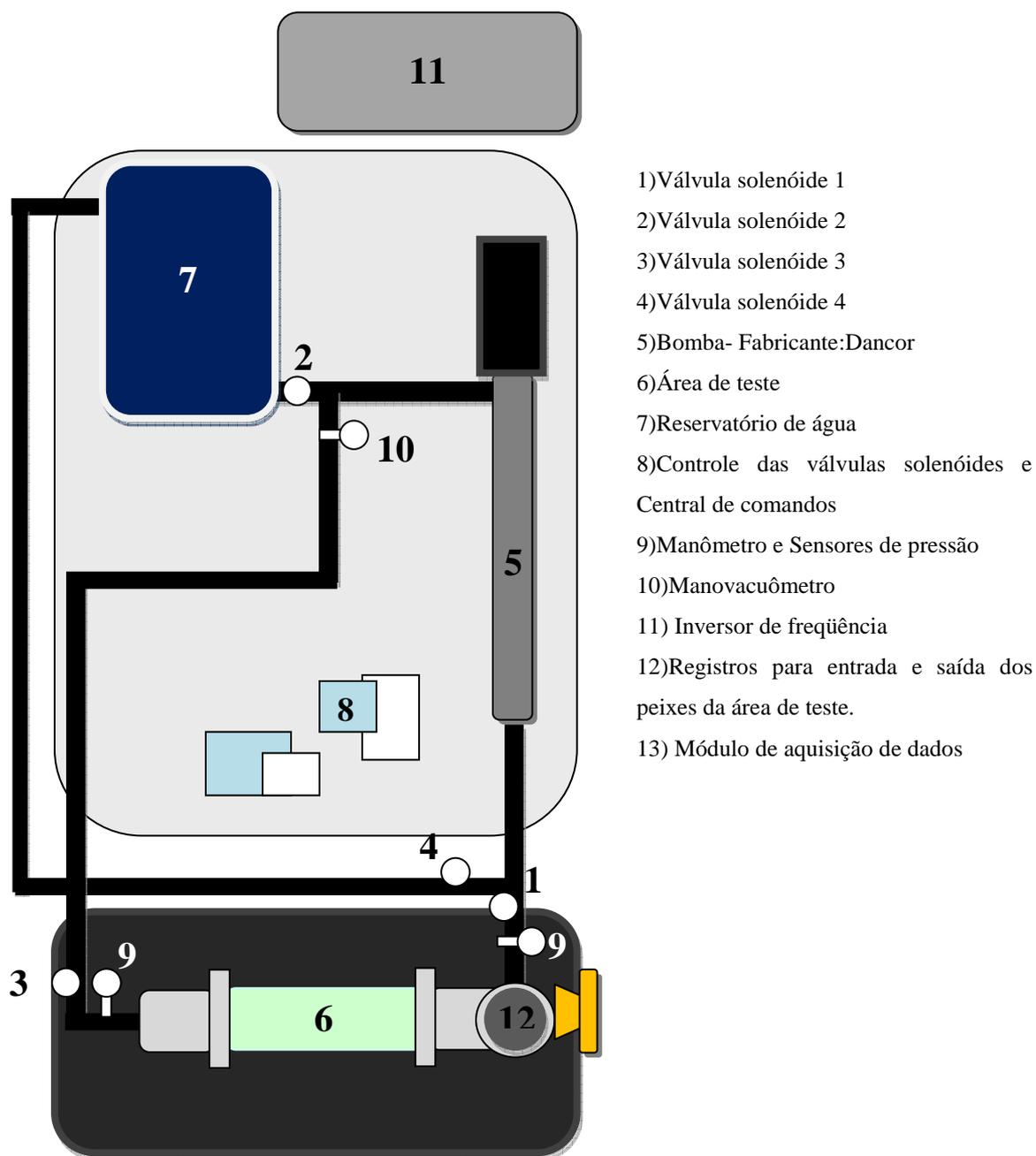


FIGURA 3.16 – Arranjo esquemático da bancada do aparato horizontal de pressão.

Os procedimentos específicos para a utilização do aparato durante os testes de pressão são listados a seguir:

1. Com o indivíduo posicionado na seção de teste, fecha-se o registro de entrada (superior);
2. Em seguida abrem-se as válvulas V1, V2 e V3, para permitir o fluxo de água sem pressurização. A válvula V4 deve permanecer fechada;
3. Aciona-se a bomba de múltiplos estágios até se alcançar a pressão de teste (via velocidade estabelecida pelo inversor de frequência);
4. Fecha-se a válvula V3;
5. Aguarda-se o tempo previsto para alcançar a pressão desejada;
6. Após alcançada a pressão final na seção de teste, fecha-se a válvula V1, evitando a perda de pressão;
7. Abre-se a válvula V4, desviando o fluxo de água direto para o reservatório e aguarda-se o tempo necessário para simular a permanência do indivíduo neste estágio;
8. Fecha-se a válvula V4 e simultaneamente abrem-se as válvulas V2 e V3 pelo quadro de comando, simulando a perda de pressão (descompressão) ou passagem do peixe pelo rotor da turbina;
9. Com esse procedimento submete-se a câmara de descompressão à pressão da sucção da bomba (negativa) provocando uma descompressão rápida.
10. Abrem-se todas as válvulas, etapa de recuperação da pressão atmosférica e desliga-se a bomba;
11. Retira-se o peixe da câmara transferindo-o para o tanque de observação.

3.4.3. Marcação e acondicionamento em tanques de aclimatação e observação

Antes de serem testados, os peixes dos grupos controle e teste permaneceram no mesmo reservatório de aclimatação, por 16 a 24 horas, totalizando 10 peixes em cada tanque. Estes tanques eram equipados com sistema de filtragem e de aeração, além de serem cobertos lateralmente com revestimento escuro procurando minimizar o estresse dos peixes. Foram utilizados 3 tanques com capacidade de 300 litros. A densidade de 10 mandis por tanques foi previamente verificada quanto a sua eficiência de acondicionamento. Utilizou-se como critério para a observação o mínimo estresse relacionado ao territorialismo e ao nível de agressividade apresentado pelo grupo de peixes. Como os mandis tentam permanecer no fundo do tanque, observou-se que o número de 10 peixes era adequado para o acondicionamento. Durante o período de acondicionamento os peixes não eram alimentados.

A biometria dos peixes foi realizada através da medida do comprimento total, comprimento padrão, largura, altura utilizando um paquímetro, e do peso total, em balança de precisão.

A marcação de todos os peixes testados, tanto os do grupo controle quanto os do grupo teste, se fez necessária devido ao acondicionamento no mesmo tanque após os testes. Para a identificação individual de 10 peixes foram utilizadas dois locais de marcação (nadadeira caudal e nadadeira dorsal) e 5 diferentes cores para a padronização das marcas. A FIGURA 3.17 mostra exemplos das marcas coloridas nas nadadeiras dorsal e caudal de um mandi-amarelo e de um lambari.



FIGURA 3.17 – Exemplo de um mandi-amarelo com a identificação por marcas coloridas nas nadadeiras e de um lambari.

A marcação foi realizada por um equipamento específico para identificação de peixes que funciona como uma pistola de pressão de tinta própria que realiza marcas entre os raios na base das nadadeiras. O equipamento utilizado foi o BMX 2000 *MICRO-Ject* (New West Research and Engineering Laboratories, Santa Rosa, CA) que libera 0,10 ml de tinta biologicamente inerte sob pressão a cada disparo, conforme mostrado na FIGURA 3.18.



FIGURA 3.18 – Exemplo do equipamento de marcação utilizado.

3.4.4. Metodologia para a observação interna dos peixes – dissecação

A partir dos relatos de testes descritos na literatura e nos indícios dos dados preliminares obtidos no laboratório do CPH, verificou-se a necessidade de avaliar a ocorrência de traumas internos nos peixes testados. Assim, definiu-se um terceiro grupo de peixes que foram testados e posteriormente dissecados em diferentes intervalos de tempo após os testes. Essa metodologia objetivou a caracterização qualitativa dos possíveis efeitos internos do teste de pressão, principalmente quanto à formação de bolhas de ar ou hemorragias visíveis a olho nu e traumas na bexiga natatória. A dissecação dos peixes foi realizada através de uma incisão ventral no sentido longitudinal, partindo da papila urogenital, sendo retirado o trato digestivo e separado o estômago para a observação da bexiga natatória, FIGURA 3.19. Foram dissecados 14 mandis e 7 lambaris para um período que variou de 0 a 96 horas após teste. Realizou-se o registro dos dados observados com auxílio de anotações e documentação com imagem digital.

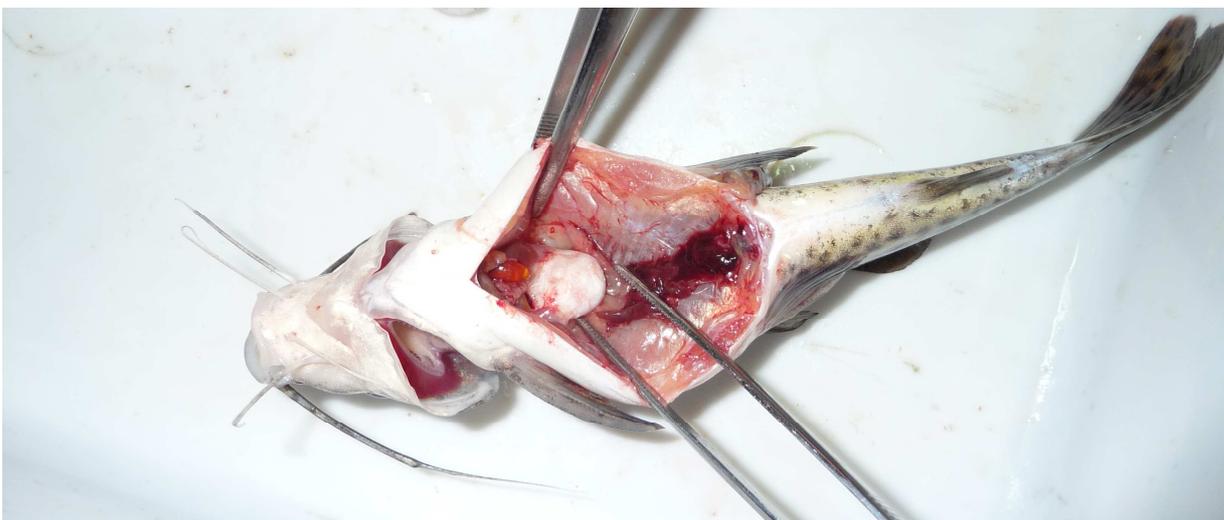


FIGURA 3.19 – Dissecação de um mandi-amarelo após 96 horas do término do teste de pressão. Detalhe para avaliação das condições da bexiga natatória.

A FIGURA 3.20 apresenta a instrumentação e o procedimento utilizado para narcose dos peixes, através da imersão em compartimento com gelo, antes da realização da dissecação.



FIGURA 3.20 – Instrumentação e procedimento preparatório para a narcose antes da dissecação.

3.5. Testes de turbulência

Pesquisas têm mostrado que altos índices de turbulência associada à passagem de peixes por turbinas, vertedores e condições de escoamento à jusante de estruturas tais como tubos de sucção e canais de fuga presentes nas usinas hidrelétricas podem causar efeitos negativos para o trânsito de peixes para montante e principalmente para jusante do barramento. Apesar deste tipo de perturbação no escoamento ter sido pouco estudada, suspeita-se que a turbulência excessiva em escala comparada ao tamanho dos peixes possa causar danos diretos e até mesmo a morte. Em escalas maiores, é possível que a turbulência possa desorientá-los, deixando-os mais susceptíveis aos predadores.

Apesar da ocorrência no trajeto no interior de turbinas das hidrelétricas é extremamente difícil obter medidas diretas de turbulência em turbinas devido à complexidade e custo inerentes no processo de instalação e operação de instrumentos em suas estruturas (Weiland e Carlson 2003). Devido a essas dificuldades, medidas dinâmicas e outros aspectos hidrodinâmicos das turbinas têm sido geralmente levantados utilizando-se de modelos físicos em escala reduzida. Muitos avanços também têm ocorrido a partir do uso de modelagem dinâmica computacional 3-D para caracterização hidrodinâmica da operação de turbinas hidráulicas e seus impactos na ictiofauna.

Com o objetivo de se desenvolver um melhor entendimento acerca dos fenômenos que provocam mortandade de peixes, foi projetado e construído um aparato experimental para gerar intensidades de turbulência em laboratório, expor peixes migradores e quantificar as respostas biológicas destes experimentos. Estas respostas biológicas serão medidas em termos de danos, mortalidade direta (instantânea e a médio prazo) e alteração na capacidade de reação, característica que pode alterar a susceptibilidade a ataques predatórios.

3.5.1. Bancadas de testes

A bancada de teste projetada para estudar o efeito da turbulência constituiu-se basicamente de um aquário dividido em duas seções distintas. Uma seção de teste foi projetada para possibilitar o estabelecimento da turbulência e submeter peixes a estas condições e a outra seção foi projetada para o condicionamento dos peixes nas etapas de pré e pós-testes.

A condição de turbulência no interior do aparato foi estabelecida, inicialmente, pelo funcionamento de um conjunto moto-bomba de 2 cv de potência que trabalha em circuito fechado. O escoamento proveniente da bomba era distribuído por um conjunto de tubulações de 3/4" perfuradas que injetam água nos quatro cantos na seção de testes através de jatos multidirecionais. A FIGURA 3.21 mostra a bancada e os componentes do sistema hidráulico que permitem a circulação e o estabelecimento das condições de turbulência.

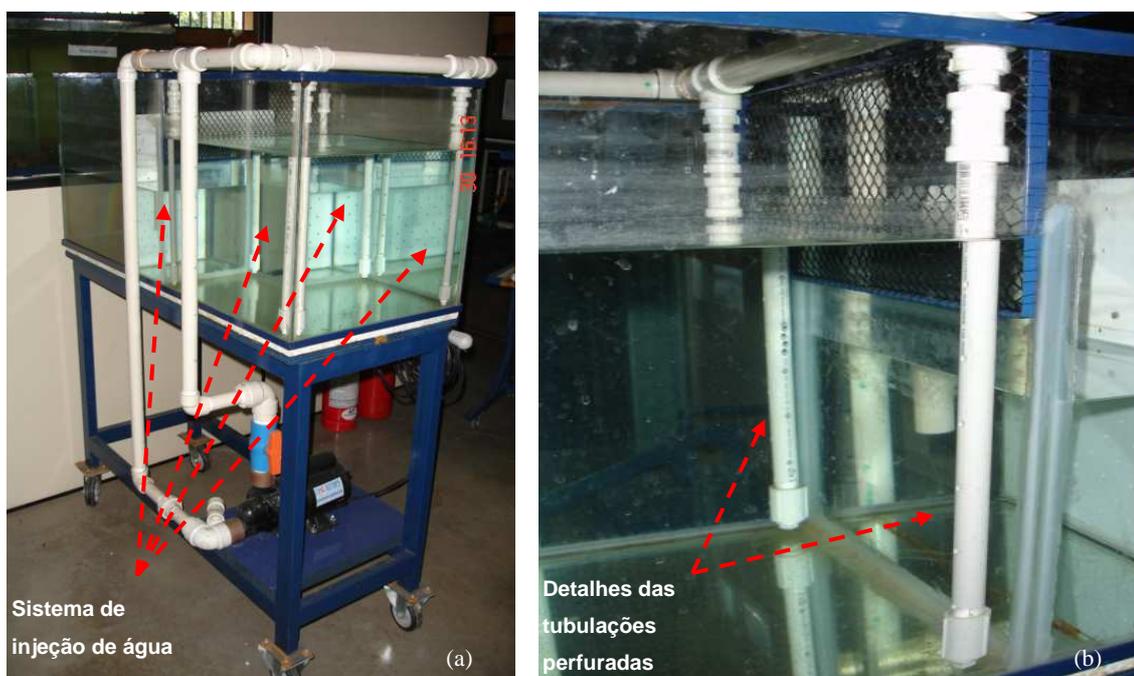


FIGURA 3.21 – (a) Vista lateral do aparato de teste com destaque para as quatro colunas de injeção submersa de água. (b) Detalhe das tubulações verticais perfuradas para a injeção.

3.5.2. Mapeamento da intensidade de turbulência na bancada

Na medição de um escoamento, os valores de velocidade instantânea em um determinado ponto de observação podem oscilar muito dependendo da turbulência. Conforme discutido no capítulo 3, a turbulência é uma característica física do fluido, que por se tratar de um fenômeno não determinístico, muitas vezes é descrita por grandezas estatísticas, por exemplo, a partir da intensidade de turbulência.

A intensidade da turbulência (IT) representa a relação entre as flutuações de velocidade e o valor médio temporal. Para mapear a energia cinética turbulenta e conseqüentemente a intensidade de turbulência no interior da seção de testes foi utilizado um velocímetro acústico *Doppler* - MicroADV 16 MHz (Sontek/YSI Inc., San Diego, CA, USA). Esse instrumento permite medir a velocidade do escoamento nos três eixos cartesianos (x,y e z) através do

princípio do efeito *Doppler*. Segundo esse princípio, se uma fonte de som está se deslocando em relação a um receptor, a frequência do som percebida pelo receptor é deslocada em relação à frequência. Esse equipamento utiliza transdutores acústicos receptores e transmissores, dispostos de modo a operar em feixes estreitos. Segundo o manual do fabricante (SONTEK, 2001), o ADV mede os vetores tridimensionais da velocidade a partir de um volume de medida localizado a aproximadamente 5 cm da sonda emissora. A FIGURA 3.22 mostra o esquema de funcionamento da emissão e recepção de sinais e um exemplo de ADV para uso em campo e em laboratório.

As sondas do tipo ADV são largamente utilizadas também para medições em campo para faixas de velocidades que variam entre 0,1 a 250 cm/s a partir de um volume de medida cilíndrico de 6mm de diâmetro e altura de 9mm (e.g. Kraus *et al.* 1994; Nikora e Goring 1998, 2000; Nikora *et al.* 2002).

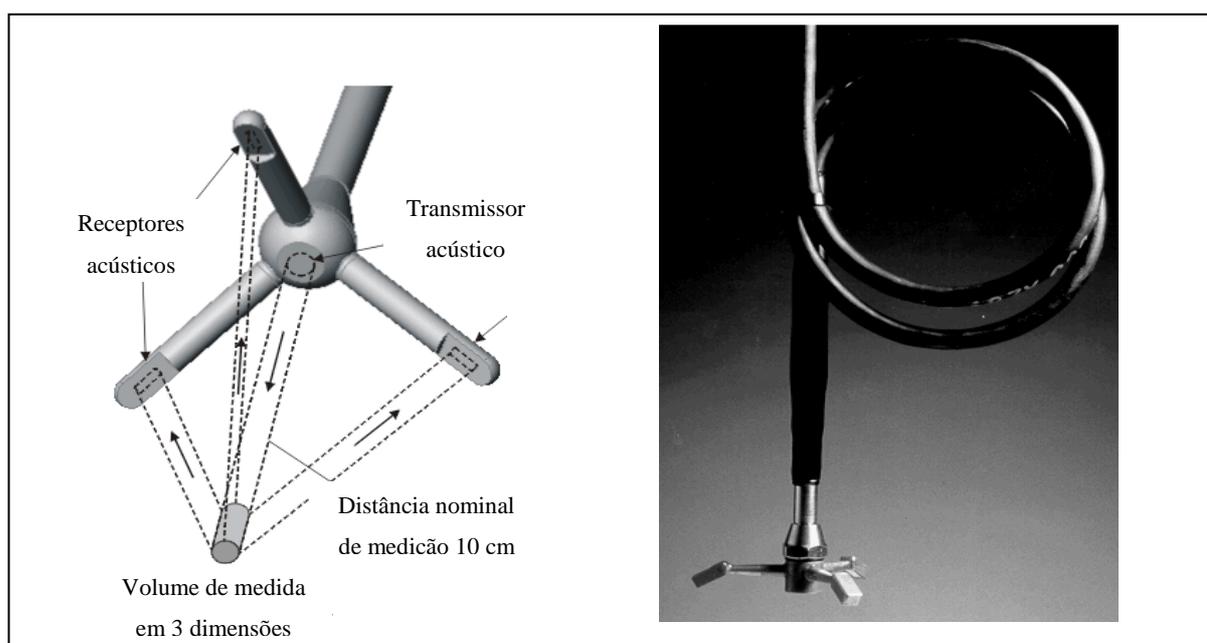


FIGURA 3.22 – Detalhes do sistema de emissão e recepção do ADV.

A avaliação da intensidade de turbulência na seção de testes do aparato construído foi realizada através do mapeamento das características hidrodinâmicas do aparato utilizando um ADV. O mapeamento da seção de testes com o ADV foi realizado através de um sistema posicionador tri-dimensional construído para permitir a variação dos pontos de medição ao longo das várias seções do aparato. A FIGURA 3.23 mostra detalhes do sistema de posicionamento utilizado para o mapeamento da turbulência com o ADV.

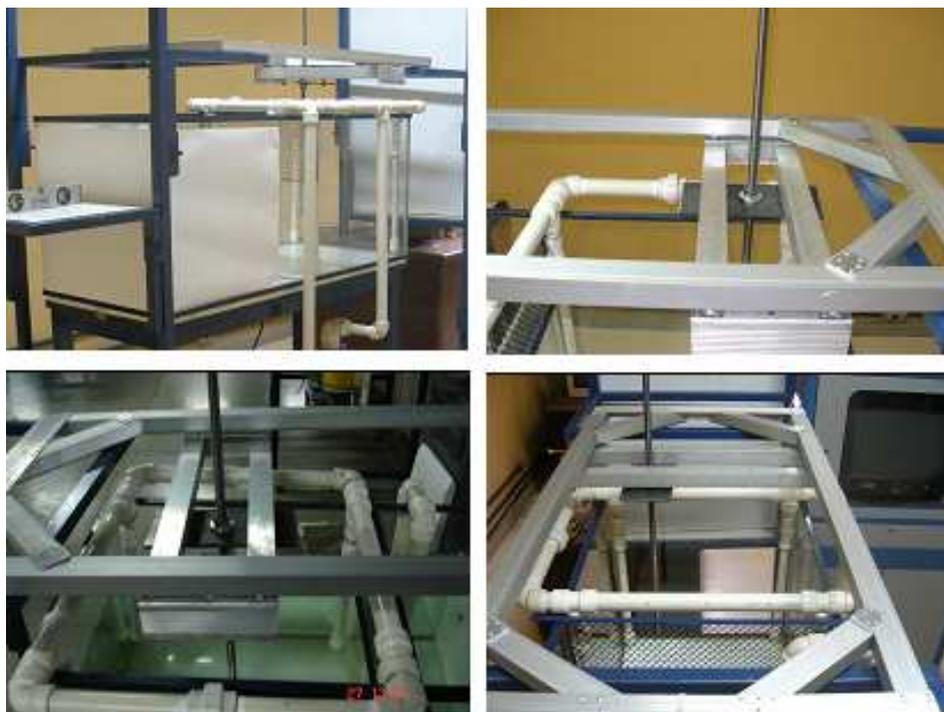


FIGURA 3.23 – Vista lateral e superior do sistema de posicionamento do ADV.

Inicialmente, foi realizado o nivelamento do sistema de posicionamento com o ADV acoplado e coletadas as medições em oito pontos espaçados longitudinalmente a cada 5 cm, ao longo de sete seções espaçadas transversalmente a cada 5 cm e ao longo de seis planos verticalmente espaçados a cada 5 cm, totalizando um mapeamento de 336 pontos igualmente distribuídos em um volume de aproximadamente 40 x 35 x 30 cm, FIGURA 3.24.

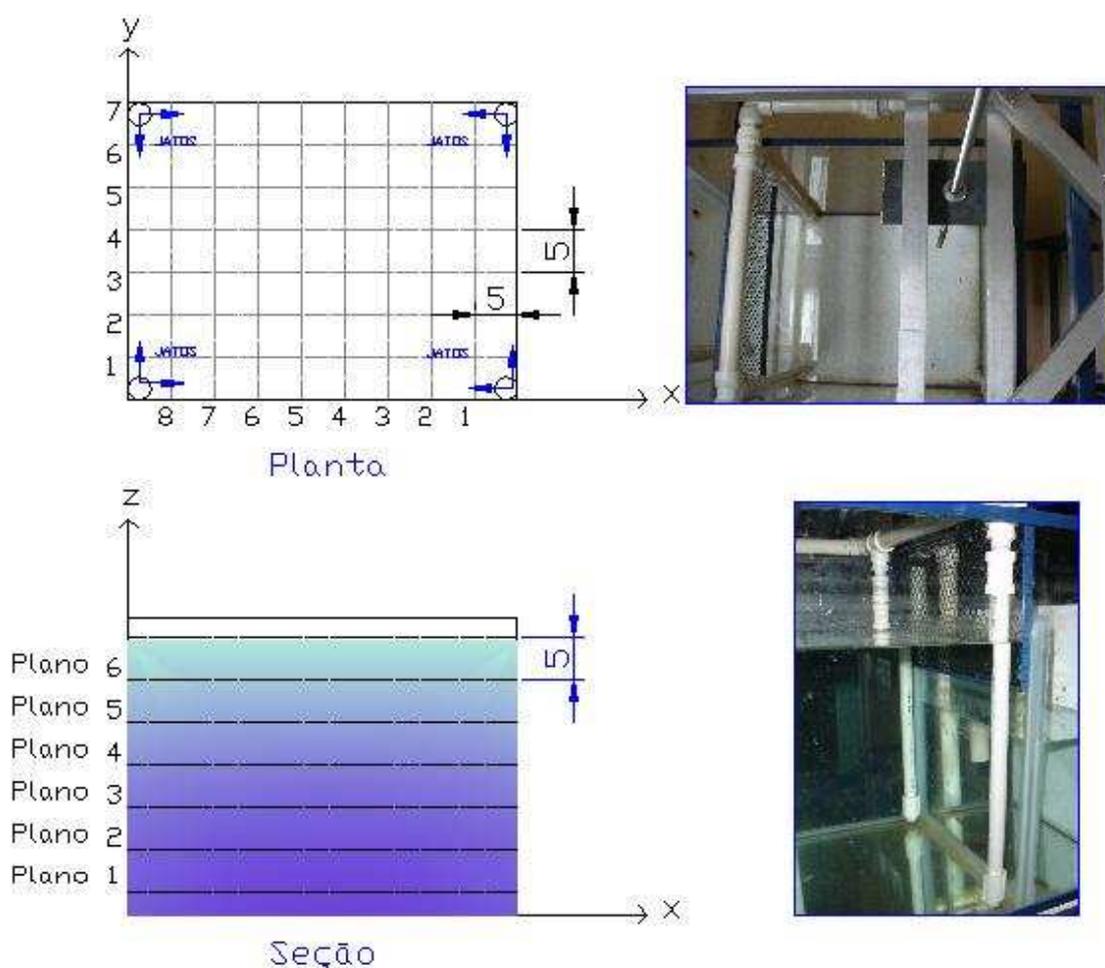


FIGURA 3.24 – Mapa chave dos pontos a serem coletados pelo ADV.

Os valores de velocidade nas três dimensões e sua variação no tempo para cada ponto do mapeamento coletados pelo ADV foram tratados através do software WinADV fornecido pelo fabricante do ADV utilizado (SonTek Inc). Este software possibilita, além da compilação dos dados, a aplicação de filtros a partir de uma rotina própria, tal como o proposto por Goring e Nikora (2002) e implementado no *software* por Wahl (2003).

Durante a aquisição dos dados de velocidade, foram armazenados, para cada instante, os valores de SNR (“*signal-to-noise ratio*”). O nível de ruído N é medido no início de cada sequência de medição e é aproximadamente igual ao nível de ruído eletrônico para o ADV. Sendo I o sinal medido, a relação sinal-ruído (SNR), pode ser definida a partir da Equação 4.1. Os valores de SNR estão relacionados à quantidade de partículas suspensas na água. Assim, um valor mais elevado de SNR indica a existência de maior concentração de partículas, que resulta em medições de melhor qualidade. Nos dados coletados utilizou-se como critério de filtro o proposto pelo fabricante (SonTek, 2001 e verificado por Lohrmann *et al.* (1994), que define como boas condições de operação os dados que apresentarem uma correlação superior a 70% e uma relação sinal-ruído (SNR) superior a 15 dB. Nestas

condições de operação o ruído da velocidade horizontal é igual a 1% da faixa de velocidade para frequências de amostragem de 25 Hz. As FIGURA 3.25 e FIGURA 3.26 mostram exemplos do processamento a partir do *software* WinADV para as duas diferentes faixas velocidade utilizadas para o mapeamento da turbulência da seção de testes, 30 cm/s e 100 cm/s.

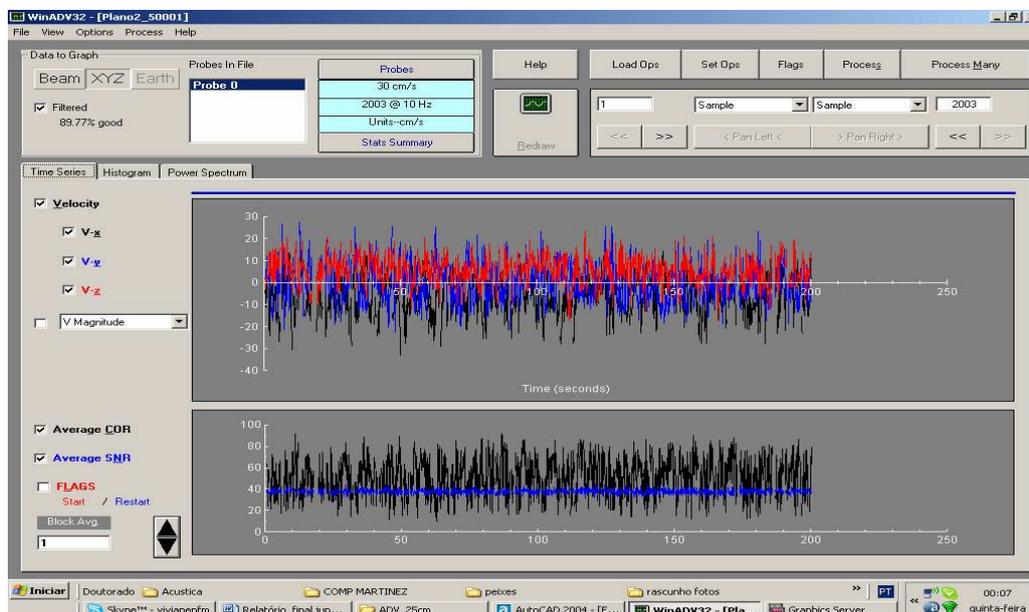


FIGURA 3.25 – Processamento dos dados coletados para um ponto na faixa 30 cm/s a partir do *software* WinADV.

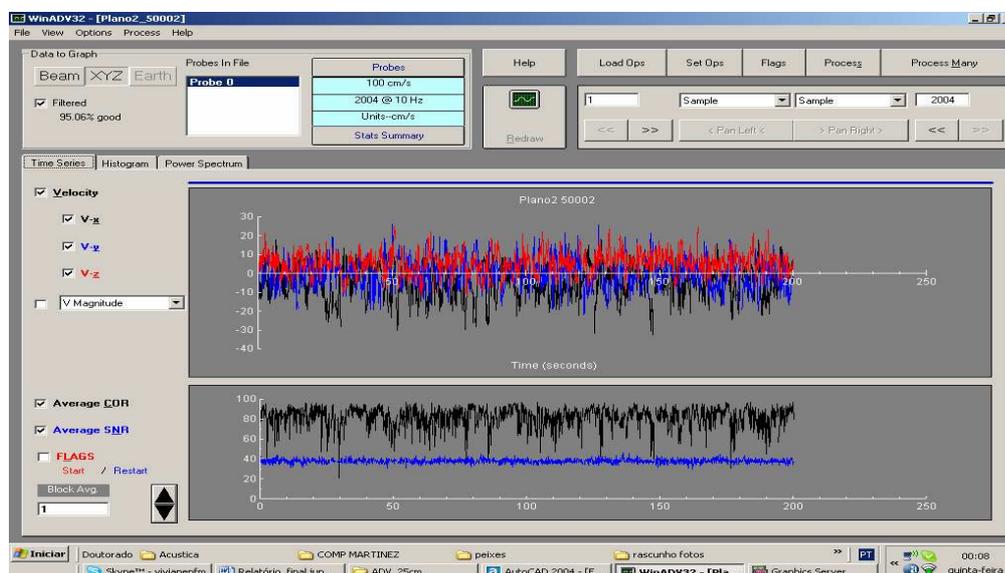


FIGURA 3.26 – Processamento dos dados coletados para um ponto na faixa 100 cm/s a partir do *software* WinADV.

A partir do mapeamento da turbulência da seção de teste foram realizados testes de comissionamento preliminares com um mandi-amarelo e um lambari. Percebeu-se com estes ensaios que a seção de teste poderia ser reduzida, garantindo o posicionamento do indivíduo na região de maior turbulência. A solução encontrada foi introduzir, na região de teste do

aparato, um cesto para confinar o peixe na região central da seção de teste. Com a utilização do cesto foi necessário realizar um novo mapeamento com o ADV da seção de testes. Este novo mapeamento cobriu cinco pontos igualmente espaçados horizontalmente e longitudinalmente, em cinco planos verticalmente espaçados a 5, 10, 15, 20 e 25 cm da face do disco de suporte do cesto, FIGURA 3.27. Para cada ponto foram realizadas 3000 medidas de velocidade a uma frequência de 25 Hz a uma faixa de velocidade máxima de 100 cm/s.

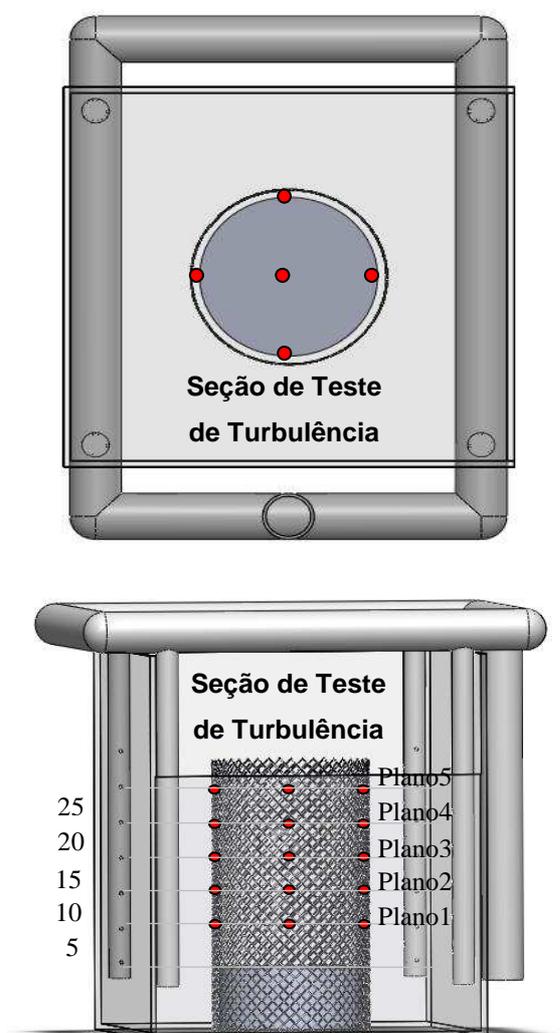


FIGURA 3.27 – Desenho esquemático da bancada de testes com destaque para os pontos de medição da intensidade de turbulência na seção de teste. Vistas superior e lateral.

A FIGURA 3.28 mostra o ADV acoplado ao sistema de posicionamento para o mapeamento da nova seção de testes.



FIGURA 3.28 – Mapeamento da turbulência com o ADV no interior do cesto.

A partir dos testes de comissionamento da bancada observou-se a necessidade de aumentar a velocidade dos jatos de água e conseqüentemente aumentar a energia cinética turbulenta no interior da seção de testes. Para tal foi instalado um novo conjunto moto-bomba de 7,5 cv, FIGURA 3.29, acionado por um inversor de frequência, que é capaz de controlar a vazão. Os dados de entrada para a parametrização do inversor foram: rotação de 2250 r.p.m., frequência de 37,9 Hz e corrente de 12,9 A. O mapeamento do cesto foi realizado com o inversor a uma rotação constante de 2000 r.p.m..



FIGURA 3.29 – Sistema de bombeamento de água do aparato de turbulência

A FIGURA 3.30 mostra uma visão geral do aparato de testes de turbulência. Os testes foram conduzidos em uma sala isolada e com iluminação restrita à seção de testes.



FIGURA 3.30 – Vista geral do aparato experimental de turbulência.

3.5.3. Metodologia dos testes de exposição à turbulência

A bancada de turbulência foi projetada de forma a permitir que valores de vazão possam ser controlados e conseqüentemente seja viável a aplicação de diferentes intensidades de turbulência.

A metodologia aqui apresentada se subdivide em 4 etapas distintas:

1. Teste de reação pré-turbulência (avaliação e registro da reação ao estímulo);
2. Teste de turbulência (permanência em condições de turbulência);
3. Teste de reação pós-turbulência (avaliação e registro da reação ao estímulo);
4. Estocagem e observação em tanques.

Semelhantemente aos testes de pressão descritos anteriormente, dois diferentes grupos de peixes foram utilizados para a realização dos experimentos: controle e teste. Os peixes foram submetidos a dois tipos de tratamento: permanência no aparato de teste por 30 minutos com e sem turbulência. Para cada tratamento realizaram-se dez repetições, totalizando 20 experimentos. Os indivíduos foram testados individualmente.

Nos testes de turbulência foram testados mandis-amarelos com comprimento médio de 16,7cm e peso médio de 44,9g.

3.5.3.1. Ajuste do Aparato experimental

Antes da realização dos testes foram realizados alguns procedimentos para a preparação do aparato:

1. Limpeza do aparato, fazendo com que a água circule pela bomba e seja descartada antes que seja utilizada no aparato;
2. Garantida a limpeza de todo o circuito, esvaziar o aparato;
3. Encher o aparato com água do tanque de manutenção;
4. Realizar as análises de pH e nível de cloro e realizar os ajustes, caso necessário;
5. Medir a temperatura da água e ajustá-la para fins de aclimatação do indivíduo.

3.5.3.2. Teste de Turbulência

O teste no grupo de controle, conforme descrito nos testes de pressão, foi realizado para a verificação dos possíveis efeitos do manejo dos indivíduos durante todos os procedimentos do teste.

Abaixo são descritos resumidamente os procedimentos realizados:

1. Selecionar os indivíduos que serão submetidos ao teste de controle;
2. Com o aparato de testes previamente preparado, transferir o indivíduo do aquário de manutenção para o aparato (procedimento inicial do teste de turbulência);
3. Aguardar até que o indivíduo esteja aclimatado, anotando suas reações;

4. Retirar o indivíduo da seção de teste de turbulência e inseri-lo na seção de teste de reação ao estímulo;
5. Deixar o indivíduo aclimatar por 20 minutos, observando suas reações;
6. Realizar os estímulos no indivíduo, 15 minutos e 20 minutos após o início da aclimatação;
7. Capturar as imagens de todas as reações aos estímulos realizados para análise posterior dos parâmetros de reação;
8. Retirar o indivíduo do aparato e colocá-lo no tanque para a observação;
9. Realizar a observação do indivíduo no intervalo de 0, 1, 24 e 48 horas após os testes, anotando todos os danos e reações adversas.

O teste de turbulência para o grupo teste seguiu exatamente os mesmos procedimentos listados acima para o grupo controle, diferenciando-se apenas pelo fato da bomba do aparato estar ligada durante a permanência na seção de testes.

3.5.3.3. Teste de reação pré e pós-turbulência

O teste de reação para avaliação da “formação do C”, conforme descrito na revisão bibliográfica, foi utilizado como uma ferramenta auxiliar de observação. Com o intuito de quantificar os efeitos da exposição à intensidade de turbulência, em indivíduos testados, foi instalado um sistema para registros das imagens em alta velocidade. Utilizou-se uma câmera da Olympus América, modelo Encore, a uma taxa de aquisição de 125 quadros por segundo. Foram realizadas filmagem com a câmera posicionada na parte superior da seção de teste (vista de cima). Para o registro das imagens capturadas pela câmera, utilizou-se uma placa de aquisição de vídeo instalada em um computador portátil que captura e armazena as imagens reproduzidas pelo monitor da câmera. A FIGURA 3.31 mostra o equipamento para a aquisição das imagens.



FIGURA 3.31 – Foto do equipamento de filmagem para registro das imagens em alta velocidade com destaque para a imagem do monitor no momento do teste.

Resumidamente são descritos abaixo os procedimentos adotados durante os testes de reação:

1. Preparam-se os sistemas de captura de imagem de alta velocidade, calibrando-os para captura de 125 quadros por segundo;
2. Ajusta-se o foco do equipamento de filmagem;
3. Testa-se o software de captura e sua sincronia com a câmera;
4. Seleciona-se um indivíduo do aquário de manutenção;
5. Inserir-se o indivíduo no aparato;
6. Aguarda-se 15 minutos para aclimação do indivíduo;
7. Dispara-se a captura das imagens;
8. Com uma haste fina, realiza-se um estímulo o mais próximo da nadadeira caudal do indivíduo;
9. Finaliza-se a captura das imagens;

10. Realiza-se a transferência das imagens capturadas para o computador, para posterior análise;
11. Repeti-se os procedimentos 6 à 9 para mais um estímulos durante o pré-teste 5 minutos após o primeiro;
12. Transfere-se o indivíduo para a seção de testes (cesto de confinamento) onde é submetido a 30 minutos na condição de turbulência. Neste período é observa-se e registra-se o comportamento e o posicionamento no interior do cesto.
13. Após realizar o teste de turbulência, retira-se o indivíduo da seção de teste do aparato de turbulência e transfere-se novamente o peixe para a seção de teste de reação;
14. Realiza-se o teste de reação ao estímulo nos intervalos: imediatamente, 5 e 10 minutos após o teste de turbulência;
15. Todas as reações aos estímulos são gravadas para posterior análise;
16. Transfere-se o peixe para o tanque de observação onde permanece por no mínimo 24 horas.

No Anexo II encontra-se o formulário para o teste de reação (formação do “C”), utilizado para a aplicação da metodologia apresentada.

3.5.3.4. Análise dos dados do teste de reação pré e pós-turbulência

Os cinco registros de reação capturados para cada peixe testado, dos grupos teste e controle, foram analisados e separados em quatro diferentes parâmetros, FIGURA 3.32:

1. tempo de reação: tempo em milisegundos, a partir do estímulo até o início do movimento de reação do peixe;
2. tempo para formação do “C máximo”: tempo em milisegundos, a partir do início do movimento de reação do peixe até a máxima curvatura em C, conforme metodologia apresentada na revisão bibliográfica;
3. tempo de retorno: tempo em milisegundos, a partir da formação do “C Máximo” até o peixe retornar à posição retilínea;
4. taxa de formação do “C máximo”: é o comprimento total do peixe dividido pela distância do ponto mais anterior da cabeça (focinho) a extremidade da cauda no momento da formação do “C máximo”, FIGURA 3.33.

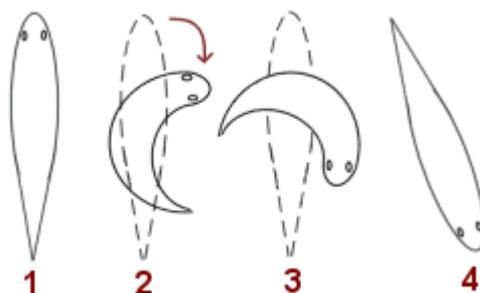


FIGURA 3.32 – Teste de Reação: 1) Início da reação; 2) C máximo; 3 e 4) Retorno da reação.
 FONTE – Adaptado de TackleMaking (2009).

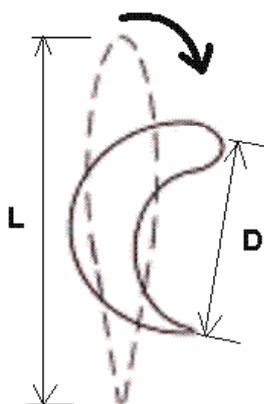


FIGURA 3.33– Taxa de formação do “C máximo”, Taxa = L/D.
 FONTE – Adaptado de TackleMaking (2009).

3.6. Tratamento estatístico

O tratamento estatístico foi composto por análise descritiva, TABELA 3.6, objetivando obter o perfil do conjunto de dados, através de medidas de localização (média e mediana), de dispersão (desvio-padrão – s, erro padrão da média) e por análise inferencial através do teste de Kolmogorov Smirnov, para verificação da condição de “normalidade” nos dados sob análise.

TABELA 3.6 – Descritiva dos peixes utilizados no estudo.

Dimensões (cm)	MANDI-AMARELO		LAMBARI	
	Controle	Teste	Controle	Teste
Comprimento Padrão	13,5	13,1	-	-
Comprimento Total	17,1	16,8	-	-
Largura	2,2	2,2	-	-
Altura	3,1	3,1	-	-
Peso (g)	42,0	40,1	10,3	12,8

O mandi-amarelo apresentou média de peso de 42,0 g para controles e 40,1g para o grupo teste. O lambari apresentou média de peso de 10,3g para o grupo controle e 12,8g para o teste. Para o mandi-amarelo, o comprimento padrão foi de 13,5 cm (controles) e 13,1 cm (teste). O comprimento total foi de 17,1 cm (controle) e 16,8 cm (teste). A largura e altura foram de 2,2 cm e 3,1 cm para o grupo controle e 2,2 cm e 3,1 cm para o grupo teste, respectivamente.

Para análise dos dados de pressão optou-se pela utilização do teste de McNemar, por permitir uma análise pareada. O teste de McNemar é um teste não-paramétrico utilizado para comparar duas proporções populacionais que estão relacionados ou correlacionados entre si. É aplicado para tomar decisão se uma determinada variável é estatisticamente relevante sobre um conjunto de indivíduos testados (controle e teste). Este teste aparece com grande frequência na análise de dados pareados resumidos no formato da TABELA 3.7, na qual se apresentam os dados pareados entre os grupos de indivíduos de controle versus o grupo de indivíduos de teste, sendo:

- k - frequência de ocorrências de sucesso em ambos os grupos;
- l - frequência de ocorrências de fracasso em ambos os grupos;
- r - frequência de ocorrências de sucesso somente no grupo de controle;
- s - frequência de ocorrências de sucesso somente no grupo de teste;
- n_1 - total de ocorrências de sucesso no grupo de controle;
- n_2 - total de ocorrências de fracasso no grupo de controle;
- m_1 - total de ocorrências de sucesso no grupo de teste;
- m_2 - total de ocorrências de fracasso no grupo de teste;
- N - total de pares (1 controle + 1 teste) de indivíduos testados.

TABELA 3.7 – Exemplo de entrada de variáveis para o teste de McNemar em tabela 2x2 e classificação de dados pareados

Variável Testada		Teste		Total
		Sim	Não	
Controle	Sim	k	R	n_1
	Não	s	L	n_2
	Total	m_1	m_2	N

A estatística não-paramétrica representa um conjunto de ferramentas de uso mais apropriado em pesquisas onde não se conhece bem a distribuição da população e seus parâmetros. Esse eventual desconhecimento da população reforça o estudo e a importância da análise de pesquisas através dos testes não-paramétricos.

Os resultados foram comparados pelo teste estatístico não paramétrico, sendo utilizado o teste de McNemar ao nível de 5% de significância.

Segundo Devore (2006), os dados pareados resultam de duas observações sobre o mesmo indivíduo ou objeto experimental. Mesmo quando isto não pode ser feito, os dados pareados com dependência dentro dos pares podem ser obtidos combinando-se os indivíduos ou objetos em uma ou mais características que se acreditou influenciarem as respostas. No caso dos mandis-amarelos, foram realizados os testes em pares de indivíduos (controle e teste) com as características aproximadamente iguais: tamanho, peso e tempo de cativeiro. Sem essa combinação (ou “bloqueio”), os resultados poderiam ser mascarados apenas porque os indivíduos de uma amostra eram mais leves e mais jovens e, assim, mais suscetíveis a uma variação de pressão que os indivíduos mais pesados e mais velhos da outra amostra. Entretanto, existe um preço a ser pago pelo pareamento – um número menor de graus de liberdade para a análise pareada – assim, se as unidades experimentais são bastante heterogêneas nas suas respostas, será difícil detectar diferenças pequenas, porém, significativas, então a perda de graus de liberdade será compensada pela precisão elevada associada ao pareamento, de modo que um experimento pareado é preferível a um experimento de amostras independentes (Devore, 2006).

Para análise dos resultados de pressão entre os lambaris e mandis-amarelos foi utilizado o teste do qui-quadrado. A análise do qui-quadrado inicia pela montagem da tabela de contingência dos grupos que se deseja verificar as diferenças em relação a uma variável dicotômica pré-definida e observada.

Para montagem da tabela de contingência, do teste qui-quadrado, utilizam-se amostras independentes, que serão comparadas (A_1 e A_2), o efeito a ser verificado e as frequências de ocorrência correspondentes à presença (a e c) ou ausência (b e d) do efeito nas amostras observadas, conforme TABELA 3.8. As amostras podem ter tamanhos diferentes ($A_1 \Rightarrow N_1$ e $A_2 \Rightarrow N_2$).

TABELA 3.8 – Contingência para o teste do qui-quadrado

	Efeito Observado		Total marginal
	Positivo	negativo	
A1	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>N1</i>
A2	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>N2</i>
Total marginal	$(a + c)$	$(b + d)$	$N1+N2$

Para análise dos dados do teste de turbulência foi utilizado o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis e Wilcoxon para verificar as diferenças entre as medidas obtidas, também a um nível de 5% de significância.

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta a compilação e a análise dos resultados obtidos com os testes de variação de pressão, realizados a partir dos dois aparatos (vertical e horizontal), e dos testes de exposição à turbulência e caracterização dos efeitos diretos e indiretos nas espécies de peixes testadas.

A partir dos resultados obtidos pelos testes de pressão foi analisada a ocorrência das seguintes variáveis:

- morte;
- hemorragia;
- exoftalmia;
- danos e bolhas;
- comportamento alterado - desorientação;
- ausência de danos observado externamente – “nada aparente”

Para o banco de dados coletados a partir do teste de reação à turbulência, foram levantadas as seguintes variáveis de observação:

- a ocorrência ou não da reação para os 5 registros de observação (2 antes e 3 depois do teste);
- ocorrida a reação, registro da ocorrência da reação em C ou em S;
- tempo para a primeira reação;
- tempo para formação do “C máximo”;
- tempo do “C máximo” até final reação (posição retilínea);
- taxa de formação do “C máximo”;
- comportamento – desorientação;
- posicionamento do peixe no interior do cesto durante o tempo de permanência em turbulência.

4.1. Testes de pressão

4.1.1. Aparato vertical

O aparato foi dividido em cinco partes, contando de forma crescente de baixo para cima, conforme apresentado no capítulo de metodologia. Foram realizados testes com mandis- amarelos para compressão máxima de 10 m.c.a. e de 50 m.c.a. seguidos de descompressão instantânea (< 1 segundo) até a pressão atmosférica.

Durante as 3 fases do teste : período de adaptação, compressão e descompressão, observou-se a distribuição dos peixes no interior do aparato. Conforme apresentado no GRÁFICO 4.1 , durante a fase de adaptação, a maioria dos peixes testados (58%), permaneceu no nível 1, 19 % no nível 2, 19 % no nível 3 e 4% no nível 5. Quando foram submetidos aos acréscimos de pressão, neste caso até a pressão máxima de 10 m.c.a, somente 26 % dos indivíduos em teste permaneceram no nível 1. Já o número de indivíduos no nível 2 caiu para 9 %, no nível 3 subiu para 35 %, 4 % no nível 4 e no nível 5 o número subiu para 26 %. Durante a descompressão 18% dos mandis-amarelos testados permaneceram no nível 3 e 82 % no nível 1.

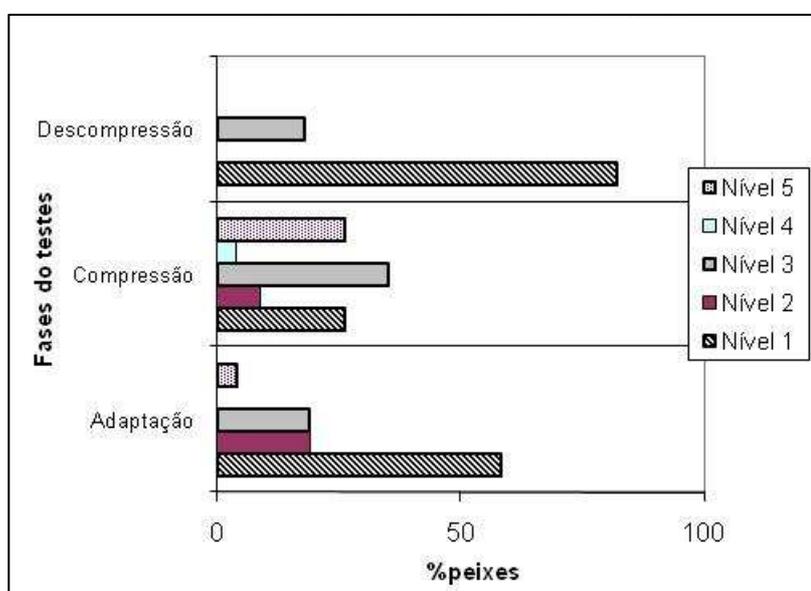


GRÁFICO 4.1 - Percentagem dos peixes nos diferentes níveis durante o teste de 10 m.c.a.

Após os testes os mandis permaneceram em tanques de observação por 96 horas. Durante este período, foram realizadas 5 observações das condições dos indivíduos submetidos à

descompressão súbita de 10 m.c.a. no aparato de pressão vertical. Os resultados quanto à porcentagem de ocorrência dos efeitos observados são apresentados na TABELA 4.1. e pelo GRÁFICO 4.2.

TABELA 4.1- Percentagem de mandi-amarelos afetados após o teste de pressão a 10 m.c.a. e descompressão imediata

Efeito Analisado	Tempo pós-teste (h)					
	0h	1h	24h	48h	72h	96h
DANOS	15%	19%	50%	73%	50%	35%
FUNGOS	0%	0%	12%	12%	15%	12%
HEMORRAGIA	31%	27%	4%	8%	0%	0%
MORTE	0%	0%	0%	0%	4%	0%
REAÇÃO ALTERADA	58%	15%	4%	4%	0%	0%

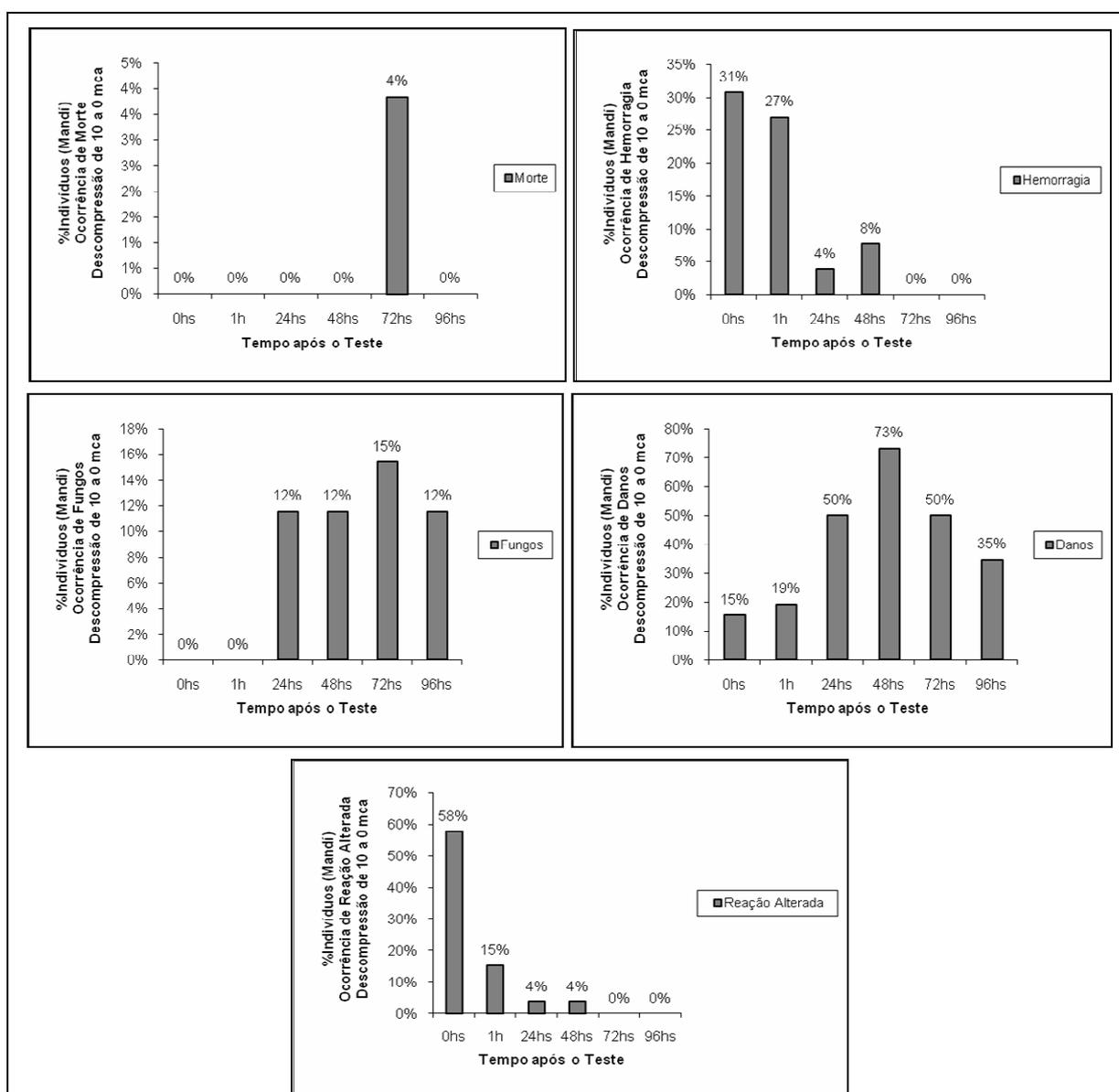


GRÁFICO 4.2 - Condições após o teste de descompressão a 10 m.c.a. – Aparato vertical.

As TABELA 4.2 a TABELA 4.4 apresentam os resultados dos danos observados para o mandi-amarelo tendo sido divididos em 3 categoria de tamanhos de peixes.

TABELA 4.2 – Percentagem de mandi-amarelos afetados após o teste de pressão a 10 m.c.a. e descompressão imediata considerando apenas os exemplares pequenos (menores que 15cm de comprimento total) - Mandi-amarelo.

Efeito Analisado	Tempo pós-teste (h)					
	0h	1h	24h	48h	72h	96h
DANOS	10%	10%	40%	70%	50%	20%
FUNGOS	0%	0%	20%	10%	10%	0%
HEMORRAGIA	30%	30%	0%	0%	0%	0%
MORTE	0%	0%	0%	0%	0%	0%
REAÇÃO ALTERADA	50%	10%	10%	0%	0%	0%

TABELA 4.3 – Percentagem de mandi-amarelos afetados após o teste de pressão a 10 m.c.a. e descompressão imediata considerando apenas os exemplares médios (de 15 a 20 cm comprimento) - *Mandi-amarelo*.

Efeito Analisado	Tempo pós-teste (h)					
	0h	1h	24h	48h	72h	96h
DANOS	33%	50%	33%	67%	50%	67%
FUNGOS	0%	0%	0%	0%	17%	17%
HEMORRAGIA	33%	17%	0%	0%	0%	0%
MORTE	0%	0%	0%	0%	0%	0%
REAÇÃO ALTERADA	83%	33%	0%	0%	0%	0%

TABELA 4.4 – Percentagem de mandi-amarelos afetados após o teste de pressão a 10 m.c.a. e descompressão imediata considerando apenas os exemplares grandes (maiores que 20 cm comprimento) - *Mandi-amarelo*.

Efeito Analisado	Tempo pós-teste (h)					
	0h	1h	24h	48h	72h	96h
DANOS	10%	10%	70%	80%	50%	30%
FUNGOS	0%	0%	10%	20%	20%	20%
HEMORRAGIA	30%	30%	10%	20%	0%	0%
MORTE	0%	0%	0%	0%	10%	0%
REAÇÃO ALTERADA	50%	10%	0%	10%	0%	0%

Pela análise dos dados apresentada no GRÁFICO 4.2, percebe-se que a porcentagem de danos, categoria na qual foram considerados quebra de ferrão, lesões na calda e barbatanas, etc, apresenta uma tendência de aumento até 48 horas após o teste, chegando a mais de 70% dos peixes testados, seguido por redução na ocorrência nas horas seguintes.

Quanto à ocorrência de hemorragias após o teste de 10 mca, pode ser observada uma redução de 31%, 0h após o teste, para 8% após 48h e em 72 horas já não são mais observadas. As FIGURA 4.1 e FIGURA 4.2 mostram exemplos de hemorragias observadas nos testes. O ligeiro aumento na porcentagem de ocorrência, entre os dados de 24 e 48 horas, se deve à incidência de fungo, FIGURA 4.2, em um indivíduo no qual não foi observado hemorragia no período de 24 horas, e foi observado no período seguinte.

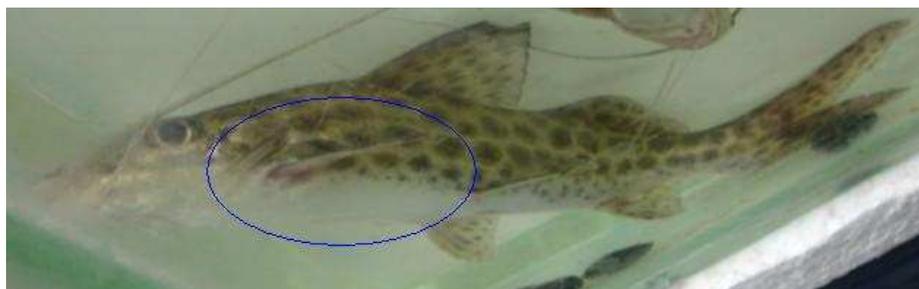


FIGURA 4.1– Exemplo de hemorragia observada na região de ferrão ocorrida 0h após o teste.



FIGURA 4.2 – Hemorragia na região da boca para a observação 0h pós- teste e fungo 48h pós-teste.

A taxa de indivíduos com reação alterada cai gradativamente de quase 60% logo após os testes para zero em 72 horas. No entanto, observa-se a ocorrência de fungo em mais de 10% dos indivíduos a partir de 24 horas da realização dos testes. Essa taxa sobe para 15% no

período de 72 horas e depois regride novamente. A ocorrência de morte ocorre somente no período após 72 horas, em apenas um caso.

O mesmo levantamento foi realizado para o teste de compressão máxima de 50 m.c.a seguida de descompressão instantânea. Os dados quanto ao posicionamento dos mandi-amarelos, *Mandi-amarelo*, no período de adaptação, na compressão e na descompressão durante os testes de pressão podem ser observados no GRÁFICO 4.3.

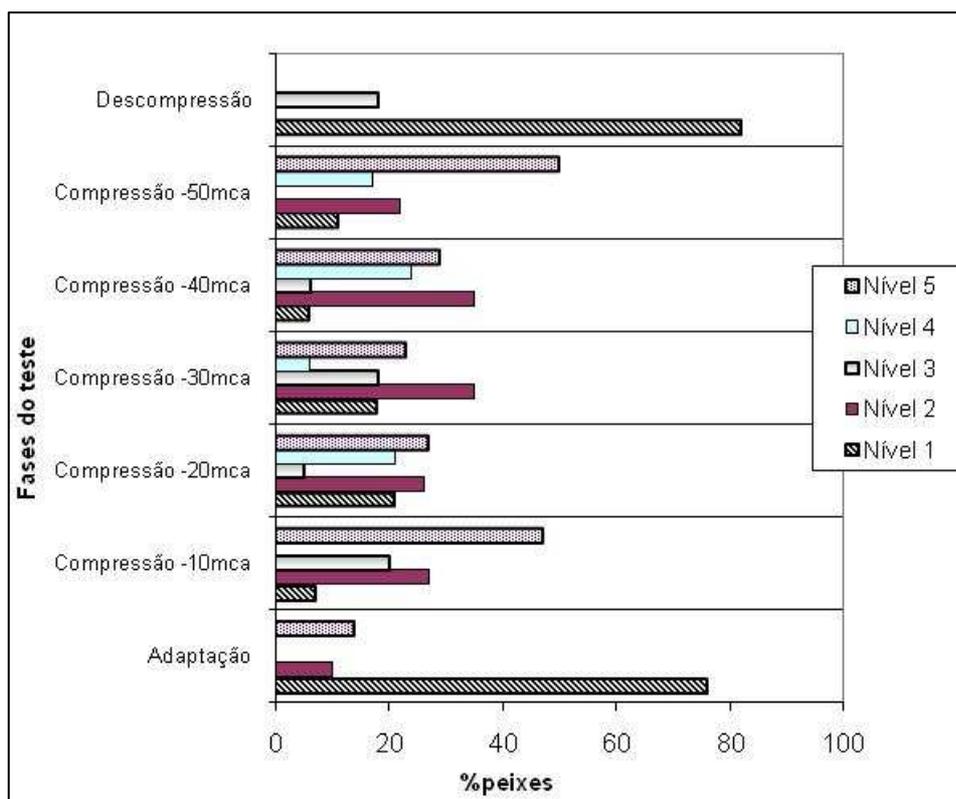


GRÁFICO 4.3 - Posição dos peixes nos diferentes níveis para o teste a 50 m.c.a.

No período de adaptação observou-se que 76% dos indivíduos permaneceram no nível 1, 10% no nível 2 e 14% no nível 5. Com a compressão até 10 m.c.a. a porcentagem de indivíduos no nível 1 caiu bruscamente para 7%, no nível 2 se elevou para 27%, são observados 20% dos indivíduos no nível 3 e ocorre uma elevação no número de indivíduos do nível 5 para 47%.

Ao aumentar a compressão para 20 m.c.a., ocorre uma ligeira elevação do número de indivíduos no nível 1 chegando a 21%, o nível 2 permanece quase inalterado com 26%, o número de indivíduos encontrados no nível 3 caiu para 5%, são observados 21% indivíduos no nível 4, e a taxa no nível 5 caiu para 27%.

Com a elevação da pressão para 30 m.c.a., observou-se que o número de indivíduos localizados no nível 1 cai para 18%, ocorrendo uma elevação da taxa de peixes no nível 2 e 3 para 35% e 18% respectivamente, no nível 4 tem-se uma diminuição do número de indivíduos para 6% e no nível 5 há uma diminuição na taxa para 23%.

Elevando-se a pressão para 40 m.c.a. a taxa de indivíduos no nível 1 caiu para 6%, no nível 2 permaneceu inalterada, no nível 3 há uma redução para 6%, o número de peixes encontrados no nível 4 elevou-se para 24% e no nível 5 sofre um aumento para 29%. Com a compressão máxima de 50 m.c.a. são observados 11% dos indivíduos no nível 1, no nível 2 ocorre uma redução da taxa para 22%, não são observados indivíduos no nível 3, há uma redução no nível 4 para 17% e a metade dos indivíduos, 50%, são observados no nível 5. Após a decompressão súbita, observou-se o retorno da maioria dos peixes, 75%, para o nível 1, permanecendo 19% no nível 4 e 6% no nível 5. Em seguida foi realizada a análise das condições dos indivíduos devido ao experimento de decompressão súbita de 50 m.c.a.. Para tal foram feitas observações logo após o experimento, e nos períodos de 1, 24, 48, 72 e 96 horas, os resultados encontrados nesse teste são apresentados nas TABELAS 4.5 a TABELA 4.7 e no GRÁFICO 4.4.

TABELA 4.5 – Percentagem de mandis afetados após o teste de pressão a 50 m.c.a. e decompressão imediata - *Mandi-amarelo*.

Efeito Analisado	Tempo pós-teste(h)					
	0h	1h	24h	48h	72h	96h
DANOS	33%	13%	17%	13%	33%	33%
FUNGOS	0%	0%	0%	13%	21%	21%
HEMORRAGIA	17%	13%	38%	38%	17%	13%
MORTE	0%	0%	0%	0%	4%	21%
REAÇÃO ALTERADA	25%	0%	0%	17%	0%	4%

TABELA 4.6 - Percentagem de mandis afetados após o teste de pressão a 50 m.c.a. e decompressão imediata, considerando apenas os exemplares pequenos (menores que 15 cm comprimento total)- *Mandi-amarelo*.

Efeito Analisado	Tempo pós-teste (h)					
	0h	1h	24h	48h	72h	96h
DANOS	29%	14%	14%	14%	38%	29%
FUNGOS	0%	0%	0%	14%	19%	24%
HEMORRAGIA	19%	14%	43%	33%	19%	14%
MORTE	0%	0%	0%	0%	5%	19%
REAÇÃO ALTERADA	24%	0%	0%	19%	0%	5%

TABELA 4.7 – Percentagem de mandis afetados após o teste de pressão a 50 m.c.a. e descompressão imediata, considerando apenas os exemplares médios (de 15 a 20 cm comprimento)- *Mandi-amarelo*.

Efeito Analisado	Tempo pós-teste (h)					
	0h	1h	24h	48h	72h	96h
DANOS	67%	0%	33%	0%	0%	67%
FUNGOS	0%	0%	0%	0%	33%	0%
HEMORRAGIA	0%	0%	0%	67%	0%	0%
MORTE	0%	0%	0%	0%	0%	33%
REAÇÃO ALTERADA	33%	0%	0%	0%	0%	0%

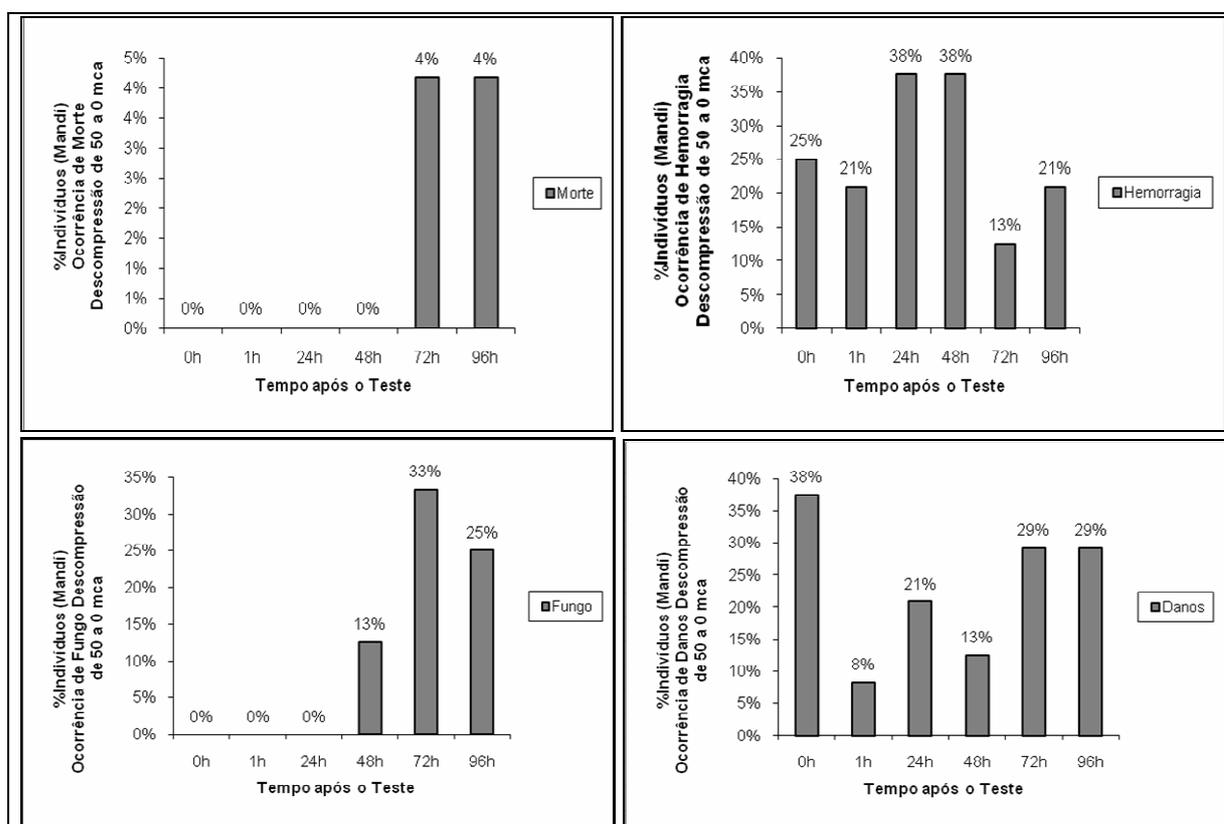


GRÁFICO 4.4- Condições dos peixes após o teste de descompressão de 50 m.c.a.

Pelo gráfico pode-se observar que aproximadamente 34% dos indivíduos sofrem danos na realização dos testes, essa taxa cai bruscamente para 12,5% na primeira hora e sobe novamente a partir de 72 horas. O índice de hemorragia é de 17% no momento após a realização dos testes, se eleva para patamares de 37% nos períodos de 24 e 48 horas e inicia uma regressão a partir de 72 horas. Observa-se a ocorrência de fungo nos indivíduos a partir do período de 48 horas, com elevação dos valores nas próximas horas, chegando a 21%. Ocorreram mortes de 4% dos indivíduos no período de 72 horas e 21% no período de 96 horas.

4.1.2. Bancada horizontal – Teste de Comissionamento

Após a montagem do aparato horizontal foi executado um teste preliminar com protocolo semelhante aos testes de 50 m.c.a. realizados no aparato vertical, mas com a descompressão atingindo -8 m.c.a.. Para o teste foram utilizados um exemplar da espécie *P.maculatus* e um da espécie *A.bimaculatus*. O tamanho dos indivíduos testados pode ser visto na TABELA 4.8.

TABELA 4.8 – Dimensões dos indivíduos testados

Espécie	Comprimento Padrão(cm)	Comprimento Total(cm)
“ <i>Astyanax bimaculatus</i> ”	10	12,5
“ <i>Mandi-amarelo</i> ”	14	16,5

Após os testes foram analisadas as condições pós-ensaio dos indivíduos submetidos a descompressão súbita de 50 m.c.a para -8 m.c.a., Os resultados podem ser observados nas TABELA 4.9 e TABELA 4.10, onde o número 1 indica a ocorrência da injúria especificada e o número 0 indica a não ocorrência.

TABELA 4.9 - Resultados para a espécie “*Astyanax bimaculatus*” (lambari)

Tempo(h)	Danos externos	Hemorragia	Exofitalmia	Reação alterada	Instabilidade
0	0	1	1	1	1
1	0	1	1	1	1
24	0	0	1	1	1
48	0	0	1	1	1
72	0	0	1	0	1
96	0	0	1	0	1

TABELA 4.10 - Resultados para a espécie “*Mandi-amarelo*” (mandi-amarelo)

Tempo(h)	Danos externos	Hemorragia	Exofitalmia	Reação alterada	Instabilidade
0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0
24	0	1	0	0	0
48	0	1	0	0	0
72	0	1	0	0	0
96	0	0	0	0	0

O lambari testado, logo após o término do teste (0h pós-teste) apresentou hemorragia nas brânquias e exoftalmia, FIGURA 4.3, instabilidade e reação alterada. Na observação de 1h após o teste ainda apresentava as mesmas injúrias. Após 24 horas até 48 horas após do teste apresentava exoftalmia, reação alterada e instabilidade. No intervalo entre o terceiro dia até o quarto, com 96 horas após o teste, manteve-se o efeito da exoftalmia e instabilidade. O mandi-amarelo testado apresentou, 0h após o teste, hemorragia no ferrão esquerdo e alteração de cor; 1h depois somente permanecia a hemorragia no ferrão esquerdo e manteve este quadro até o terceiro dia, no quarto dia já não apresentava nenhuma seqüela do teste.



FIGURA 4.3 – Foto do lambari “*Astyanax bimaculatus*” três dias após teste. Detalhe da permanência de exoftalmia.

O resumo do comportamento dos indivíduos durante o teste é apresentado na TABELA 4.11. A constante variação do comportamento demonstra o incômodo causado nos peixes durante os procedimentos de compressão e decompressão da câmara de teses.

TABELA 4.11 - Comportamento dos peixes durante o ensaio

Espécie	Adaptação	10mca	20mca	30mca	40mca	50mca	"-8mca"	0mca
" <i>Astianax bimaculatus</i> "	Normal	Agitação	Extrema Agitação	Extrema Agitação	Imóvel	Imóvel	Barriga pra cima	Boiando
" <i>Mandi-amarelo</i> "	Normal	Normal	Normal	Agitação	Agitação	Imóvel	Imóvel	Imóvel

4.1.3. Bancada horizontal de pressão – Testes

Os testes realizados no aparato horizontal foram executados seguindo os procedimentos apresentados no capítulo de metodologia. A FIGURA 4.4 apresenta a tela do *software* de captura de dados no momento de um dos testes de descompressão rápida. As duas linhas representam o sinal recebido pelos transdutores de pressão instalados à jusante e montante da seção de testes.

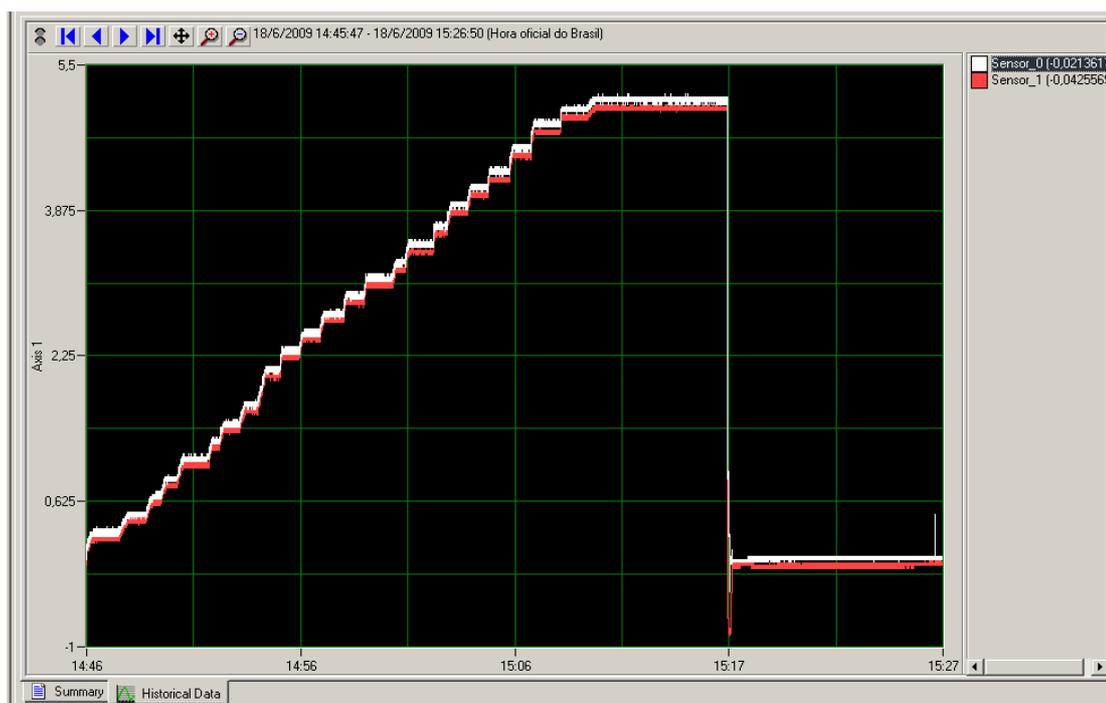


FIGURA 4.4 – Representação da tela do equipamento de medição no momento do teste de descompressão súbita de 50 m.c.a para -8 m.c.a. com recuperação para pressão atmosférica.

4.1.3.1. Resultados dos testes de pressão - LAMBARI

Os resultados obtidos nos testes com o *Astyanax bimaculatus* (lambari do rabo-amarelo) são apresentados no GRÁFICO 4.5 ao GRÁFICO 4.10 e correspondem às porcentagens de ocorrência de danos nos indivíduos testados para descompressão de 50 a -8 m.c.a. para as observações de 0, 1, 24 e 48 horas após os testes.

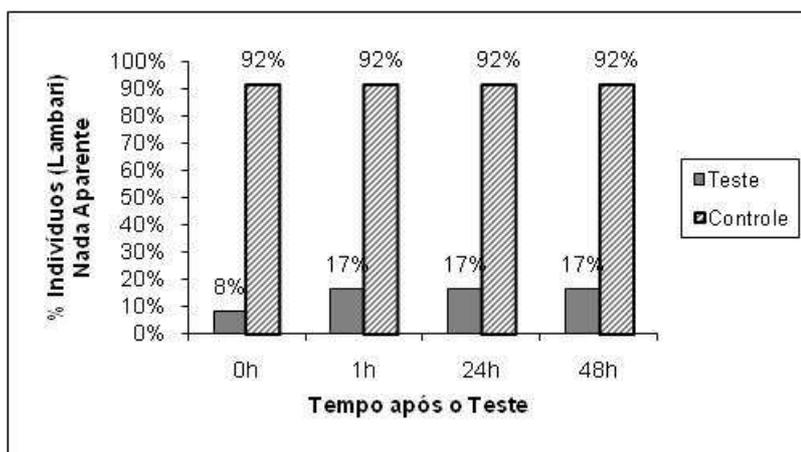


GRÁFICO 4.5 – Percentual da ocorrência da condição “ nada aparente” após o teste Astyanax bimaculatus -LAMBARI

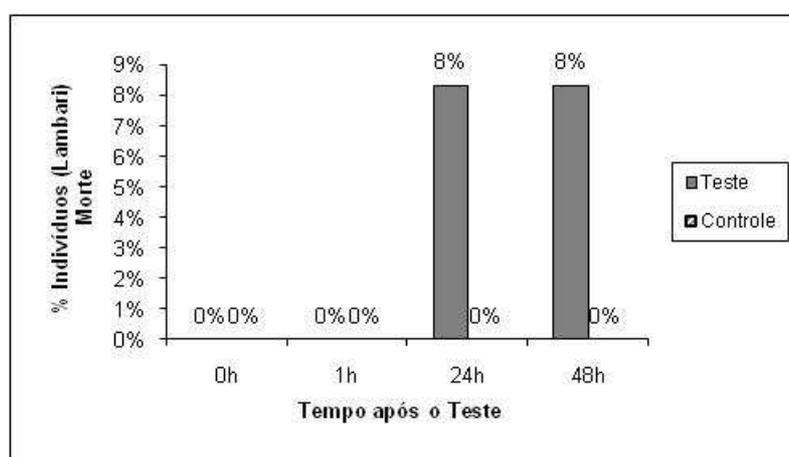


GRÁFICO 4.6 - Percentual da ocorrência da variável “ morte” após o teste Astyanax bimaculatus -LAMBARI

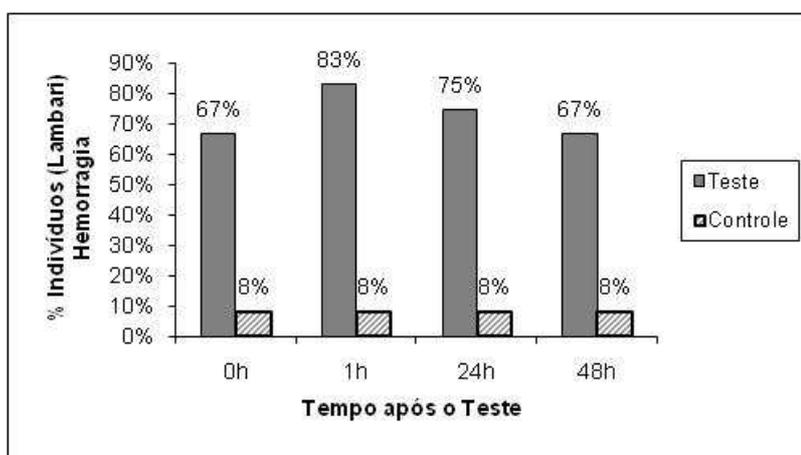


GRÁFICO 4.7 - Percentual da ocorrência da variável “ hemorragia” após o teste Astyanax bimaculatus -LAMBARI

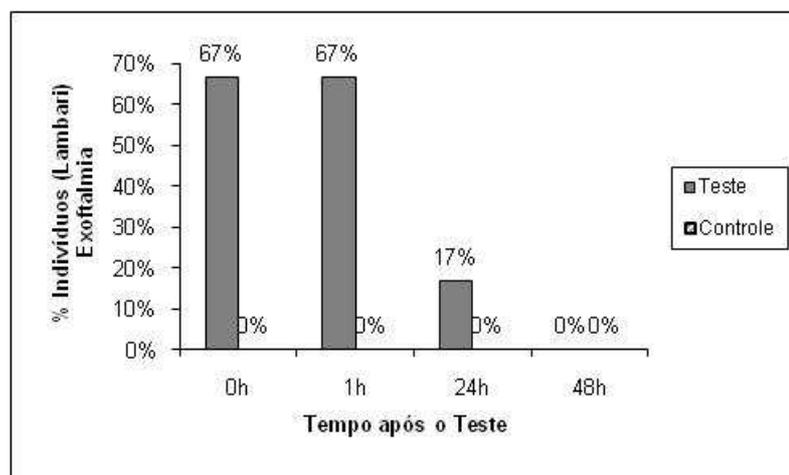


GRÁFICO 4.8 - Percentual da ocorrência da variável “exoftalmia” após o teste *Astyanax bimaculatus* -LAMBARI

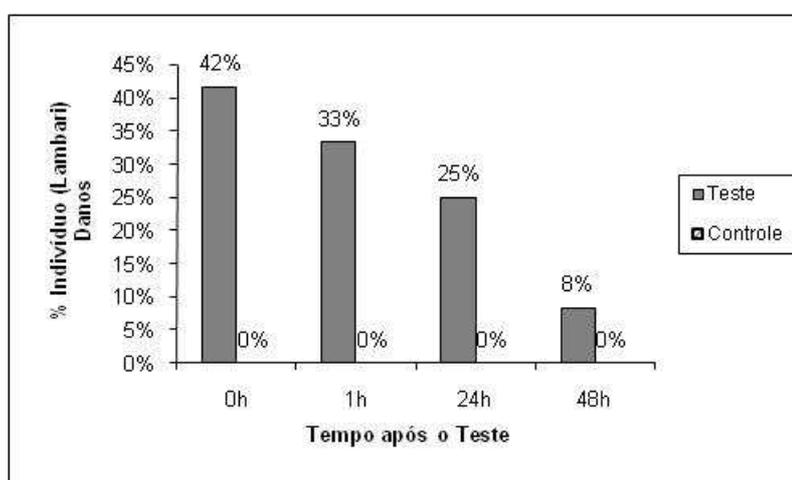


GRÁFICO 4.9 - Percentual da ocorrência da variável “danos” após o teste *Astyanax bimaculatus* -LAMBARI

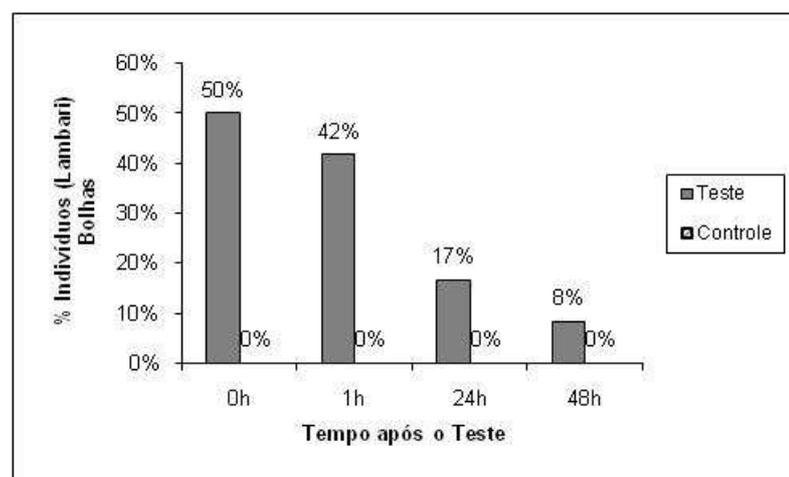


GRÁFICO 4.10 - Percentual da ocorrência da variável “bolhas” após o teste *Astyanax bimaculatus* -LAMBARI

Após os testes foram realizadas dissecações de alguns indivíduos com o objetivo de verificar, a título qualitativo, os danos internos provocados pelo efeito de descompressão abrupta. Foram observados danos nas bexigas natatórias e estômago dos lambaris testados. A FIGURA 4.5 mostra exemplos da bexiga anterior rompida.

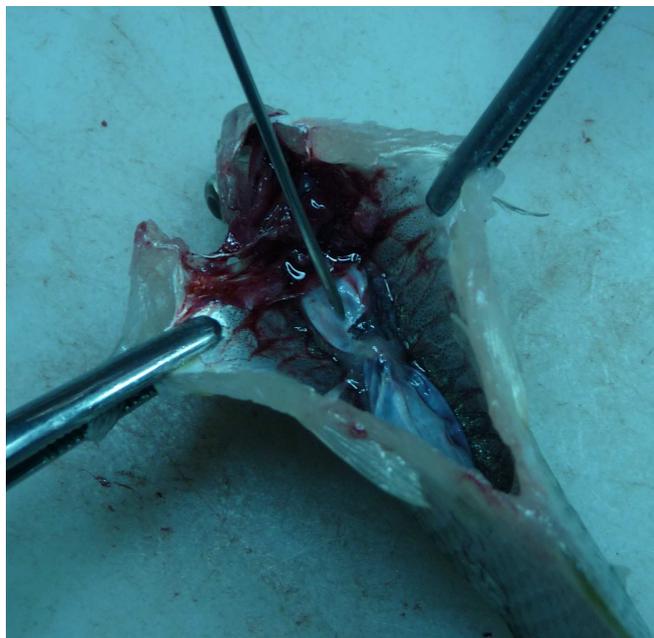


FIGURA 4.5 – Exemplo das observações quanto o estado da bexiga natatória anterior e posterior de lambaris dissecados após os teste.

Os resultados destas observações são apresentados no GRÁFICO 4.11 e no GRÁFICO 4.12.

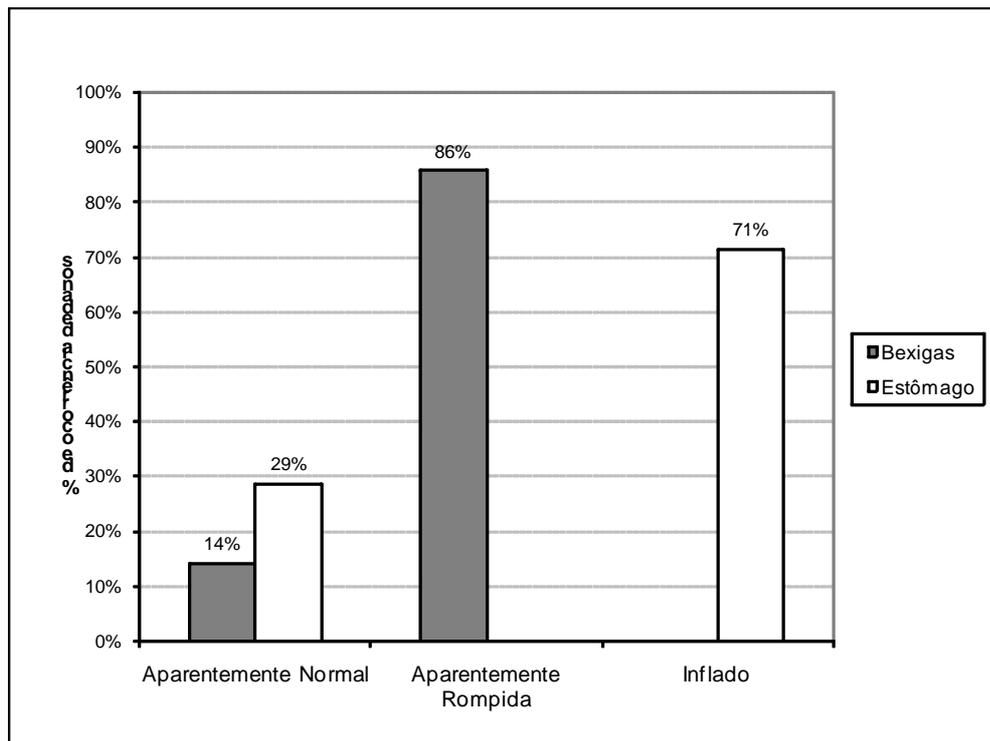


GRÁFICO 4.11- Observações da ocorrência de danos internos causados nos indivíduos (Lambaris) após o teste

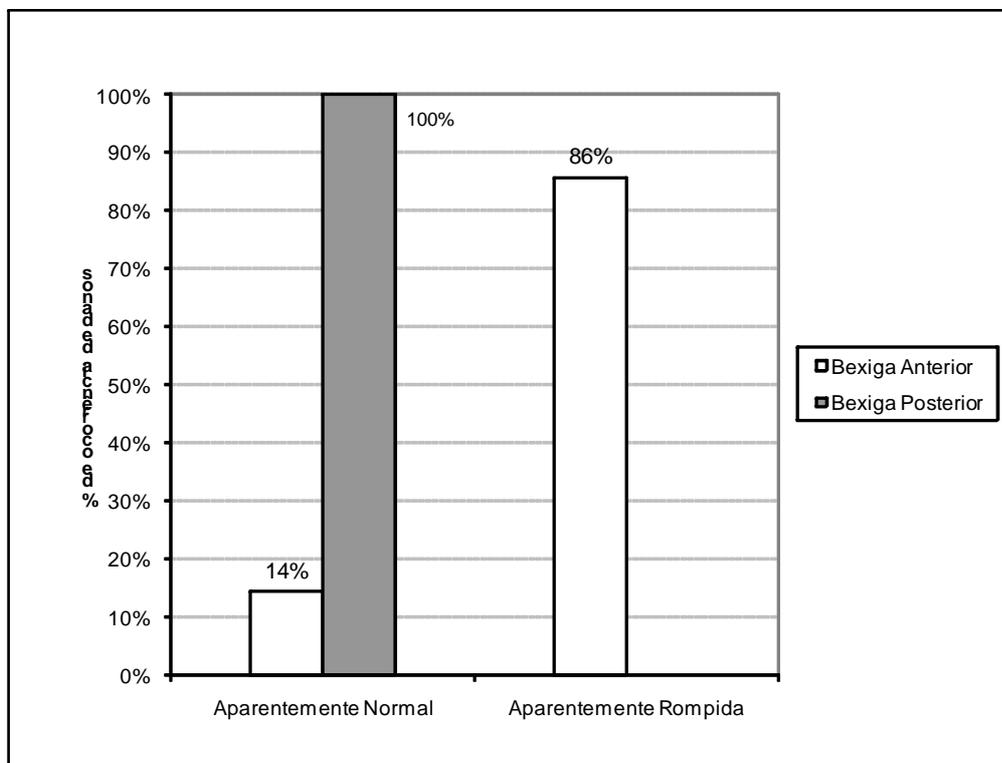


GRÁFICO 4.12 – Observações dos danos na bexigas causados nos indivíduos (Lambaris) após o teste

A TABELA 4.12 apresenta os dados compilados do resultados obtidos apartir da aplicação do teste pareado de McNemar, (Devore, 2006), para os lambaris submetidos à pressão de 50 m.c.a. e descompressão instantânea, realizando o pareamento entre os grupos controle e teste para as variáveis dicotômicas apresentadas.

TABELA 4.12 – Proporção das ocorrências de eventos para o peixe lambari, quando submetido à pressão de 50 m.c.a..

Eventos	Ocorrência pressão 50 m.c.a.				Valor p
	Controle		Teste		
	N	%	N	%	
Morte_0					
Morte_1					
Morte_24	0	0	1	8	1,000
Morte_48	0	0	1	8	1,000
Total Morte	0	0	1	8	1,000
Hemorragia_0	1	8	8	67	0,046
Hemorragia_1	1	8	10	83	0,016
Hemorragia_24	1	8	9	75	0,027
Hemorragia_48	1	8	8	67	0,046
Total Hemorragia	1	8	10	83	0,016
Exoftalmia_0	0	0	8	67	0,013
Exoftalmia_1	0	0	8	67	0,013
Exoftalmia_24	0	0	2	17	0,479
Exoftalmia_48					
Total Exoftalmia	0	0	8	67	0,013
Danos_0	0	0	5	42	0,074
Danos_1	0	0	4	33	0,134
Danos_24	0	0	3	25	0,248
Danos_48	0	0	1	8	1,000
Total Danos	0	0	5	42	0,074
Bolhas_0	0	0	6	50	0,041
Bolhas_1	0	0	5	42	0,074
Bolhas_24	0	0	2	17	0,479
Bolhas_48	0	0	1	8	1,000
Total Bolhas	0	0	6	50	0,041
NA_0	11	92	1	8	0,009
NA_1	11	92	2	17	0,027
NA_24	11	92	2	17	0,027
NA_48	11	92	2	17	0,027
Total NA	11	92	2	17	0,027

Para o lambari, utilizando o teste de McNemar (teste de diferença entre proporções pareadas) para a pressão 50 m.c.a., observaram-se diferenças estatisticamente significantes entre o grupo

controle e teste para hemorragia em todos os tempos e maiores proporções de ocorrência para o tempo um. No geral, ocorreram danos em 42% do grupo teste sem diferenças estatísticas significativas e em 50% dos indivíduos testados apresentaram bolhas com diferenças estatísticas significativas em relação ao grupo de controle ($p=0,041$) para o tempo zero. Para morte não ocorreram diferenças estatisticamente significantes. As diferenças entre o grupo de controle e o grupo de teste, quando verificado a ocorrência de nada aparente, é significativa estatisticamente ($p=0,009$) no tempo zero e reduz ao longo das 48 horas pós teste para ($p=0,027$). A verificação de ocorrência de exoftalmia nos indivíduos testados é estatisticamente significativa (67%) no grupo teste contra (0%) no grupo de controle, obtendo ($p=0,013$). É perceptível que após o teste, ao longo do período de observação, ocorre uma recuperação dos peixes. Não se pode falar nada sobre os danos internos provocados por esta variável.

4.1.3.2. Análise de pressão - MANDI-AMARELO

Nos testes de descompressão rápida, a partir das pressões máxima de 50 m.c.a e 30 m.c.a realizados em mandi-amarelos, foram verificadas as seguintes ocorrências: hemorragia, exoftalmia, danos e nada aparente. A porcentagem de ocorrência para estas observações são apresentas no GRÁFICO 4.13 ao GRÁFICO 4.18.

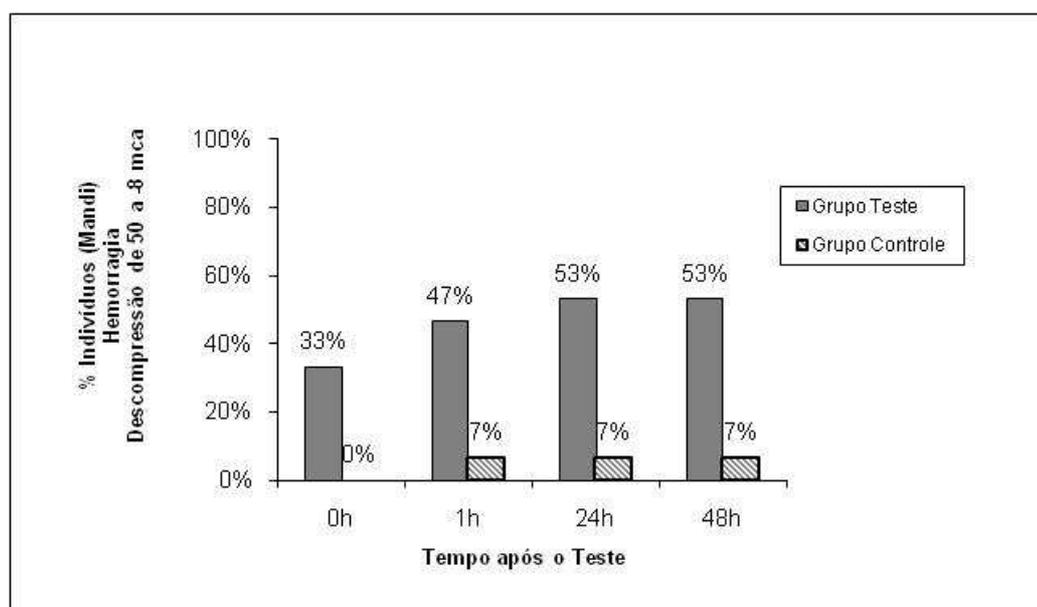


GRÁFICO 4.13 – Ocorrência de hemorragia nos mandis-amarelos após o teste de 50 a -8 m.c.a.

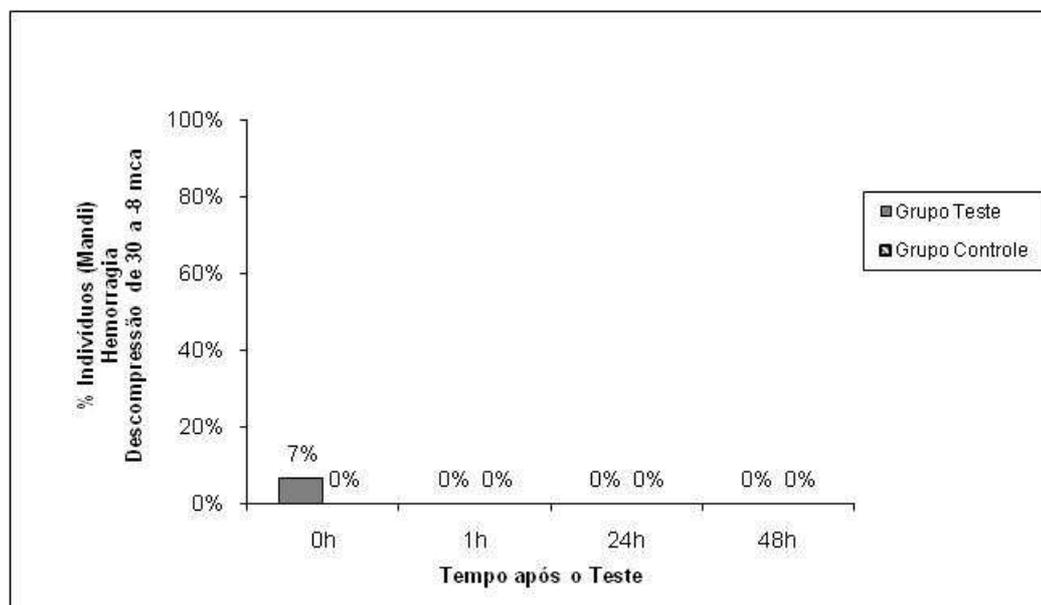


GRÁFICO 4.14 –Ocorrência de hemorragia nos mandis-amarelos após o teste de 30 a -8 m.c.a..

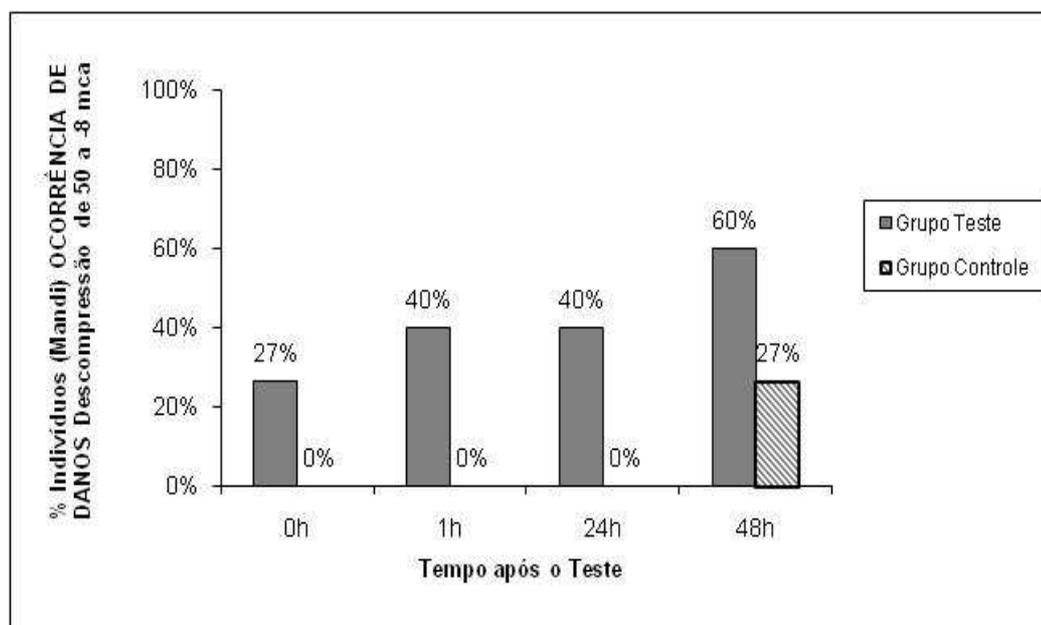


GRÁFICO 4.15 – Ocorrência de danos nos mandis-amarelos após o teste de 50 a -8 m.c.a..

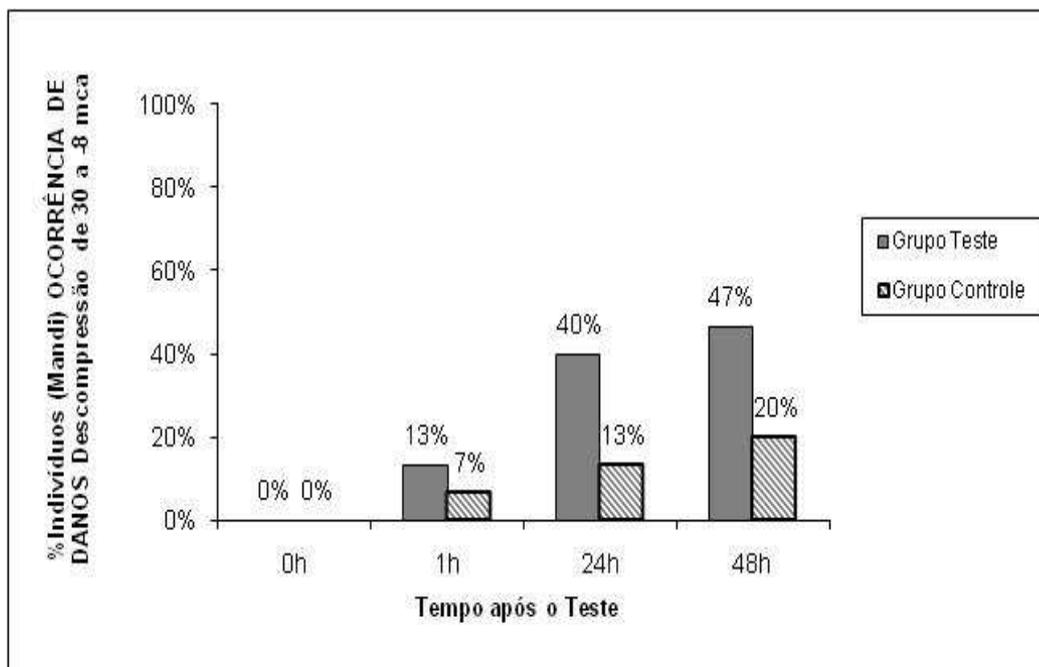


GRÁFICO 4.16 – Ocorrência de danos nos mandis-amarelos após o teste de 30 a -8 m.c.a..

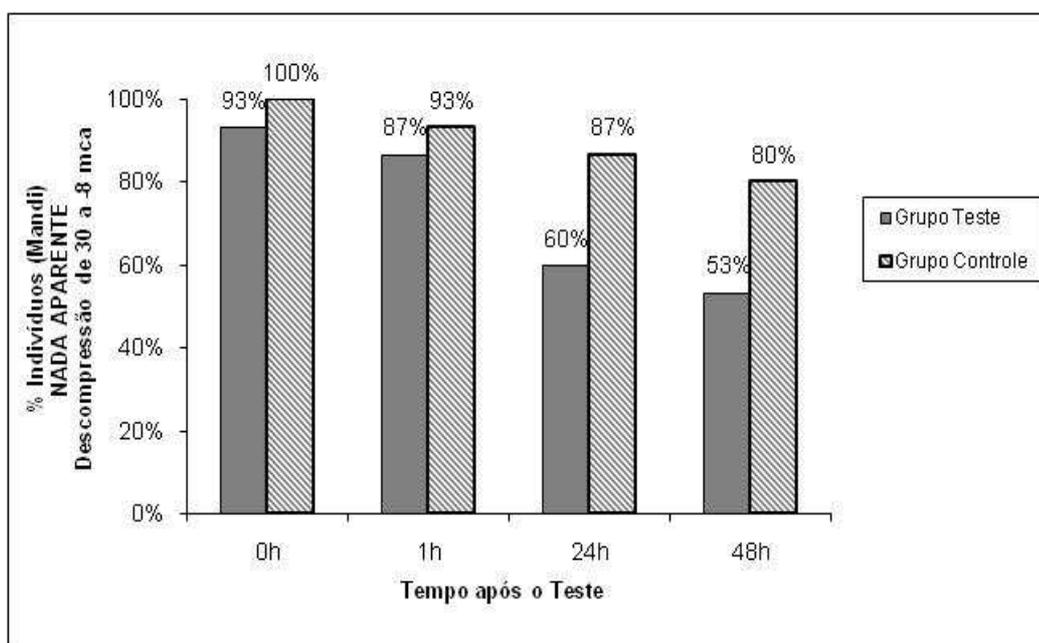


GRÁFICO 4.17 – Ocorrência de nada aparente nos mandis-amarelos após o teste de 50 a -8 m.c.a..

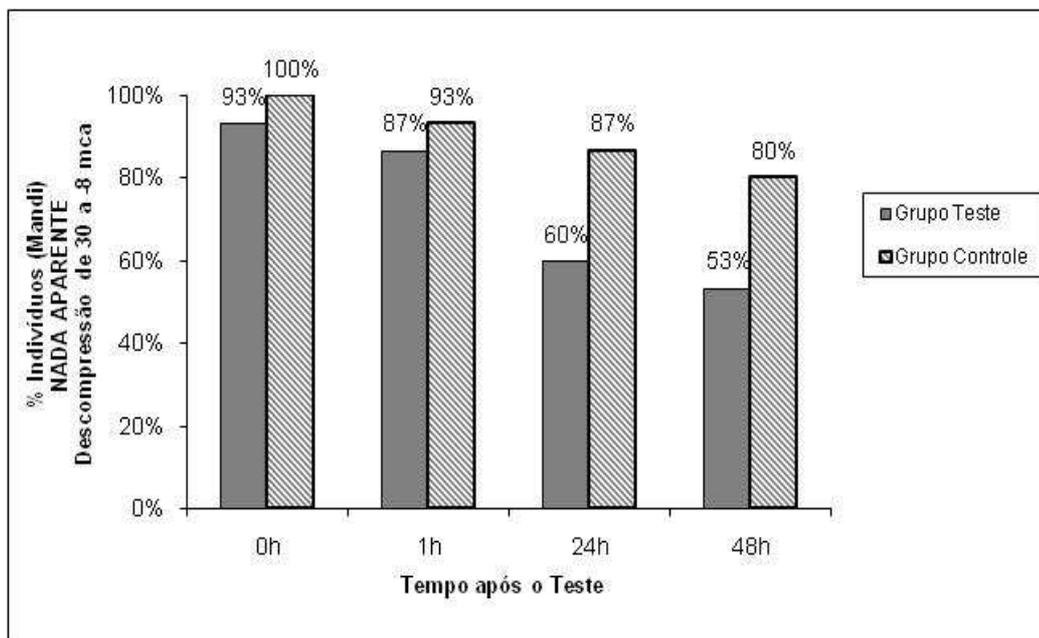


GRÁFICO 4.18 – Ocorrência de nada aparente nos mandis-amarelos após o teste de 30 a -8 m.c.a.

Foram realizadas dissecações nos mandis-amarelos antes e após a realização de algumas baterias de testes com o objetivo de avaliar as estruturas internas e os impactos causados pelo teste de descompressão. As FIGURA 4.6 à FIGURA 4.11 apresentam as fotos de algumas dissecações realizadas.



FIGURA 4.6 – Dissecação imediatamente após o teste de descompressão – 50 a -8 m.c.a..

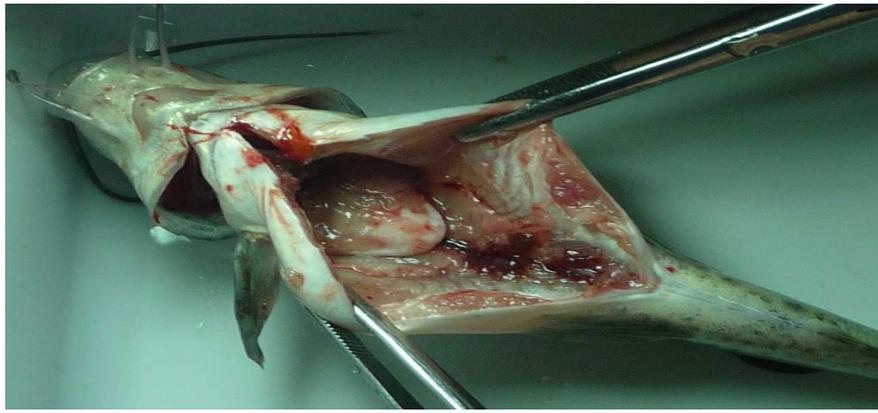


FIGURA 4.7 – Dissecação 1h após o teste de descompressão – 50 a -8 m.c.a..



FIGURA 4.8 – Dissecação de peixe não testado – detalhe para aparência da bexiga natatória.



FIGURA 4.9 – Dissecação após 22h do teste de descompressão – 50 a -8 m.c.a..



FIGURA 4.10 – Dissecção 48h após o teste de descompressão – 50 a -8m.c.a. – Detalhe peritônio cheio de ar.

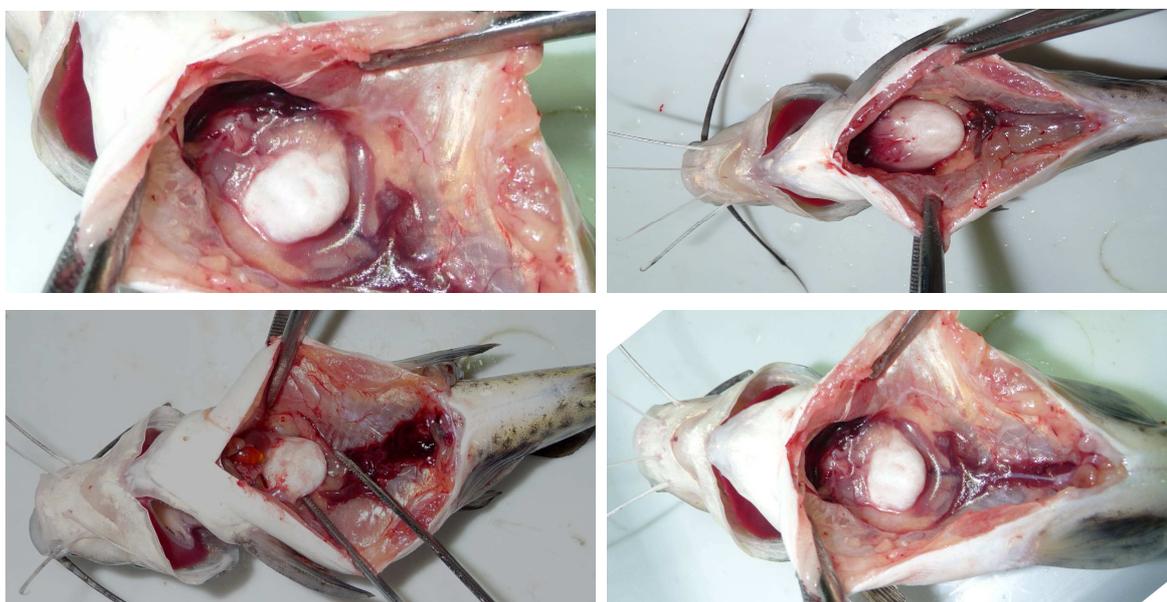


FIGURA 4.11 - Dissecções 48h após o teste de descompressão – 50 a -8 m.c.a. – Bexiga natatória com aparência de parcialmente recuperada.

Foi utilizado o teste de McNemar (teste de diferença entre proporções pareadas) para a análise entre o grupo de controle e o grupo de teste de mandis-amarelos e de lambaris, levando em consideração as variáveis dicotômicas avaliadas na TABELA 4.13.

Conforme TABELA 4.13 não foram observadas ocorrências de morte, exoftalmia e bolhas para as pressões de 30 e 50 m.c.a. em todos os tempos. Para hemorragia houve diferença estatisticamente significativa entre os grupos teste e controle no tempo 24 horas (53% vs. 7%) e 48 horas (53% vs. 7%) para pressão de 50 m.c.a., mas para pressão de 30 m.c.a não foram verificadas diferenças estatisticamente significativas.

TABELA 4.13 – Proporção das ocorrências de eventos para o peixe mandi-amarelo, quando submetido à pressão de 30 m.c.a. e de 50 m.c.a..

Eventos	Ocorrência pressão 30 m.c.a.					Ocorrência pressão 50 m.c.a.				
	Controle		Teste		Valor p	Controle		Teste		Valor p
	N	%	N	%		N	%	N	%	
Morte_0										
Morte_1										
Morte_24										
Morte_48										
Total Morte	0	0	0	0		0	0	0	0	
Hemorragia_0	0	0	1	7	1,000	0	0	5	33	0,073
Hemorragia_1						1	7	7	47	0,077
Hemorragia_24						1	7	8	53	0,046
Hemorragia_48						1	7	8	53	0,046
Total Hemorragia	0	0	1	7	1,000	1	7	8	53	0,046
Exoftalmia_0										
Exoftalmia_1										
Exoftalmia_24										
Exoftalmia_48										
Total Exoftalmia	0	0	0	0		0	0	0	0	
Danos_0						0	0	4	27	0,134
Danos_1	1	7	2	13	1,000	0	0	6	40	0,041
Danos_24	2	13	6	40	0,289	0	0	6	40	0,041
Danos_48	3	20	7	47	0,343	4	27	9	60	0,267
Total Danos	3	20	7	47	0,343	4	27	9	67	0,267
Bolhas_0										
Bolhas_1										
Bolhas_24										
Bolhas_48										
Total Bolhas	0	0	0	0		0	0	0	0	
NA_0	15	100	14	93	1,000	15	100	7	47	0,136
NA_1	14	93	13	87	1,000	14	93	4	27	0,034
NA_24	13	87	9	60	0,522	14	93	3	20	0,015
NA_48	12	80	8	53	0,502	10	67	2	13	0,043
Total NA	15	100	14	93	1,000	15	100	7	47	0,136

Para danos no tempo um (40% vs 0%) e 24 horas (40% vs 0%) com pressão 50 m.c.a. foram verificadas diferenças significantes. Para a variável NA as diferenças foram estatisticamente significantes para o tempo um com pressão 50 m.c.a. ($p=0,034$), 93% no grupo controle e 27% no grupo teste. No tempo 24 horas com a mesma pressão, esta diferença se torna mais significante ($p=0,015$), sendo 93% no controle e 20% no teste, reduzindo o nível de significância estatística no tempo 48 horas ($p=0,043$), 67% no controle e 13% no teste.

4.1.3.3. Comparação dos dados entre os indivíduos dos tipos MANDI-AMARELO e LAMBARI

Para a comparação dos dados de lambari e mandi-amarelo utilizou-se o teste qui-quadrado. O qui-quadrado mede a probabilidade de as diferenças encontradas nos dois grupos da nossa amostra serem devidas ao acaso, partindo do pressuposto que, na verdade, não há diferenças entre os dois grupos na população de onde vêm. Se a probabilidade for alta poderemos concluir que não há diferenças estatisticamente significativas. Se a probabilidade for baixa (particularmente menor que 5%) poderemos concluir que o grupo1 é diferente do grupo2 quanto ao efeito observado, e de forma estatisticamente significativa.

No entanto, o qui-quadrado tem limitações, nomeadamente, deverá ser substituído pela Prova exacta de Fisher quando os valores esperados nas células da tabela são inferiores a 5. Nestes casos, evidentemente utilizaremos o "p" unilateral de Fisher ("1-tailed P-value"). Quando não tivermos valores inferiores a 5 poderemos utilizar o valor "p" do qui-quadrado não corrigido.

Para comparação dos grupos mandi-amarelo e lambari na pressão de 50 m.c.a., utilizou-se o teste qui-quadrado, considerando que a resposta de interesse é dicotômica: a ocorrência ou não de um evento, e objetivando comparar a diferença entre as proporções de ocorrência do evento nos dois grupos (lambari e mandi-amarelo).

Os valores da tabela das variáveis dicotômicas analisadas e os grupos verificados, juntamente com seus respectivos valores de p, são apresentados na TABELA 4.14.

TABELA 4.14 – Comparação das proporção das ocorrências de eventos entre os peixes Mandi-amarelo e Lambari, quando submetido à pressão de 50 m.c.a..

Variáveis	Comparação entre Mandi-amarelo x Lambari				Valor p
	Mandi-amarelo		Lambari		
	N	%	N	%	
Morte_24	0	0	1	4	0,444
Morte_48	0	0	1	4	0,444
Total Morte	0	0	1	4	0,444
Hemorragia_0	5	17	9	38	0,077
Hemorragia_1	8	27	11	46	0,143
Hemorragia_24	9	30	10	42	0,372
Hemorragia_48	9	30	9	38	0,561
Total Hemorragia	9	30	11	46	0,134
Exoftalmia_0	0	0	8	33	0,001
Exoftalmia_1	0	0	8	33	0,001
Exoftalmia_24	0	0	2	8	0,193
Total Exoftalmia	0	0	8	33	0,001
Danos_0	4	13	5	21	0,355
Danos_1	6	20	4	17	0,519
Danos_24	6	20	3	13	0,361
Danos_48	13	43	1	4	0,001
Total Danos	13	43	5	21	0,004
Bolhas_0	0	0	6	25	0,005
Bolhas_1	0	0	5	21	0,013
Bolhas_24	0	0	2	8	0,193
Bolhas_48	0	0	1	4	0,444
Total Bolhas	0	0	6	25	0,005
NA_0	22	73	12	50	0,078
NA_1	18	60	13	54	0,667
NA_24	17	57	13	54	0,854
NA_48	12	40	13	54	0,300
Total NA	22	73	13	54	0,143

Não foram observadas diferenças estatisticamente significantes para morte, hemorragia e NA em todos os tempos. Diferenças estatisticamente significante foram observadas na ocorrência de exoftalmia e bolhas no tempo zero e um e para danos com 48 horas. Para exoftalmia, 33% das ocorrências foram nos lambaris em todos os tempos, com nenhuma ocorrência no grupo dos mandis-amarelos. Para o tempo zero e um, 33% das ocorrências foram no grupo dos lambaris. Para danos em 48 horas, 43% ocorreram no grupo dos mandis-amarelos e 4% no grupo dos lambaris. De uma forma geral, para danos as ocorrências foram de 47% para os mandis-amarelos e 21% para os lambaris ($p=0,044$). No geral, bolhas ocorreram em 25% dos lambaris. Para bolhas, no tempo zero, foram observados em 25% dos lambaris e 21% no tempo um. Mandis-amarelos não apresentaram bolhas, mortes e exoftalmia.

4.2. Comissionamento da bancada de turbulência

4.2.1. Resultado do mapeamento de velocidade no interior do cesto

Os mapeamentos das velocidades, que ocorrem na área do teste de turbulência, são apresentados na FIGURA 4.12 em cinco planos horizontais distintos a cada 5 cm.

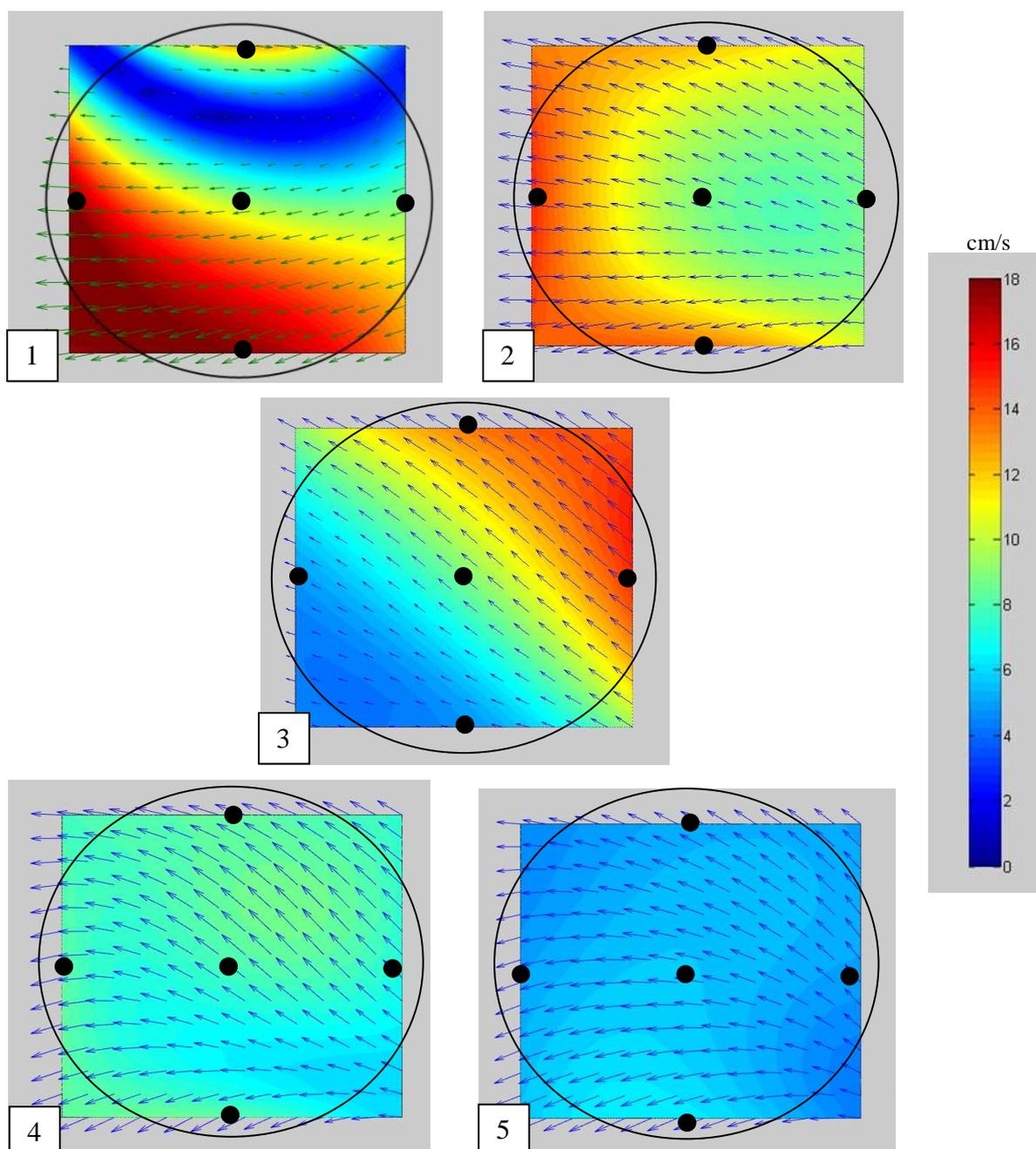


FIGURA 4.12 – Mapeamento de velocidades ocorridas no interior do cesto de teste em (cm/s) iniciando pelos planos 1 e 2, seguidos dos planos 3, 4 e 5.

4.2.2. Resultado do mapeamento da turbulência no interior do cesto

A TABELA 4.15 apresenta os valores da energia cinética turbulenta (TKE), calculados a partir dos dados de velocidade nas três direções amostradas, para os 25 pontos no interior do cesto de medidas. Foi considerado x, y e z, como as direções principais do escoamento, sendo x a direção paralela ao cesto, y a direção perpendicular ao cesto e z a direção da altura do cesto. Os valores foram coletados nos pontos central(c), norte(n), sul(s), leste(e) e oeste(w).

TABELA 4.15 - Resultados do mapeamento da turbulência no interior do cesto

Ponto	Vx méd (cm/s)	Vy méd (cm/s)	Vz méd (cm/s)	RMS(Vx) (cm/s)	RMS(Vy) (cm/s)	RMS(Vz) (cm/s)	TKE (cm ² /s ²)	% amostra utilizada
1c	-9,33	-1,13	-0,04	8,34	8,99	3,43	81,07	93,38
1n	-12,57	-1,14	-0,78	10,09	7,93	4,23	91,22	68,54
1s	-16,48	-6,52	0,19	7,94	6,10	2,78	53,96	98,03
1e	-8,11	-2,92	0,06	5,12	5,43	1,68	29,22	95,00
1w	-17,66	0,98	-0,50	8,13	7,67	4,77	73,84	87,65
2c	-8,52	2,70	-0,47	7,43	8,08	5,93	77,81	89,01
2n	-11,32	4,42	-2,68	10,59	8,62	7,95	124,78	54,44
2s	-13,00	-4,18	0,73	6,51	7,09	5,15	59,52	96,77
2e	-7,69	3,89	-0,65	6,57	8,06	5,97	71,96	85,88
2w	-14,84	1,58	-0,69	9,01	8,23	6,68	96,77	82,73
3c	-6,29	6,02	1,12	6,97	8,53	5,67	76,73	91,51
3n	-4,40	7,42	0,55	8,79	8,36	6,85	97,05	44,35
3s	-11,03	0,60	2,78	6,05	7,62	4,87	59,14	95,39
3e	-4,67	10,00	0,38	6,81	8,36	5,98	75,98	84,83
3w	-11,14	1,96	1,99	8,26	8,71	6,41	92,63	87,54
4c	-5,98	5,11	3,44	5,97	7,14	5,26	57,21	93,97
4n	-7,67	2,90	2,66	7,93	8,25	6,23	84,83	84,87
4s	-7,10	-4,05	5,86	6,86	6,57	4,79	56,62	97,70
4e	-4,85	5,24	1,12	6,09	6,81	5,19	55,18	96,23
4w	-7,95	-2,12	5,83	7,77	8,06	6,18	81,78	91,97
5c	-5,55	1,05	5,91	5,65	6,66	5,09	51,05	98,74
5n	-4,41	2,73	3,82	6,77	6,67	5,96	62,98	93,86
5s	-5,73	-2,69	6,93	5,56	5,61	4,60	41,79	99,11
5e	-2,94	4,01	1,56	4,96	6,66	5,29	48,49	97,51
5w	-4,66	-1,80	7,80	5,81	7,44	5,27	58,44	95,47

A FIGURA 4.13 apresenta os planos de teste do aparato de turbulência. Os mapeamentos da energia cinética turbulenta são representados na FIGURA 4.14 e foram realizados utilizando o *software* MatLab Versão 7.1, interpolando, com uma função *spline*, os valores acima apresentados, de forma a permitir uma melhor visualização da distribuição dos valores nas seções de teste.

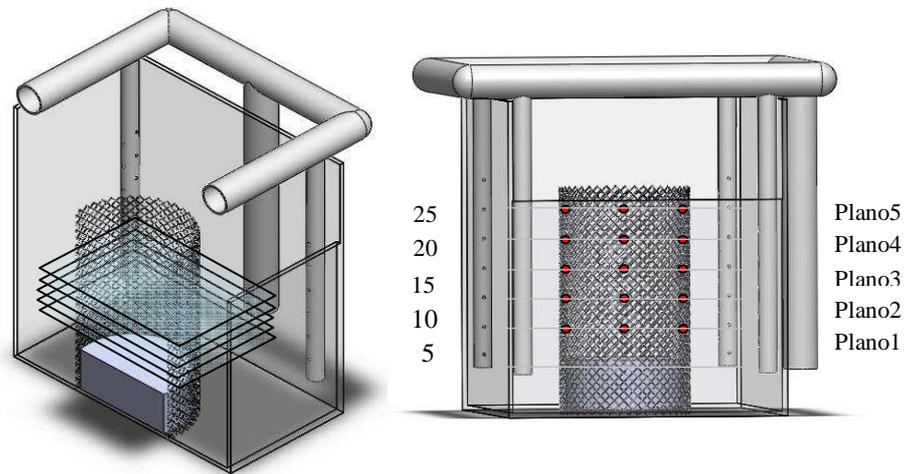


FIGURA 4.13 – Planos de teste do aparato de turbulência.

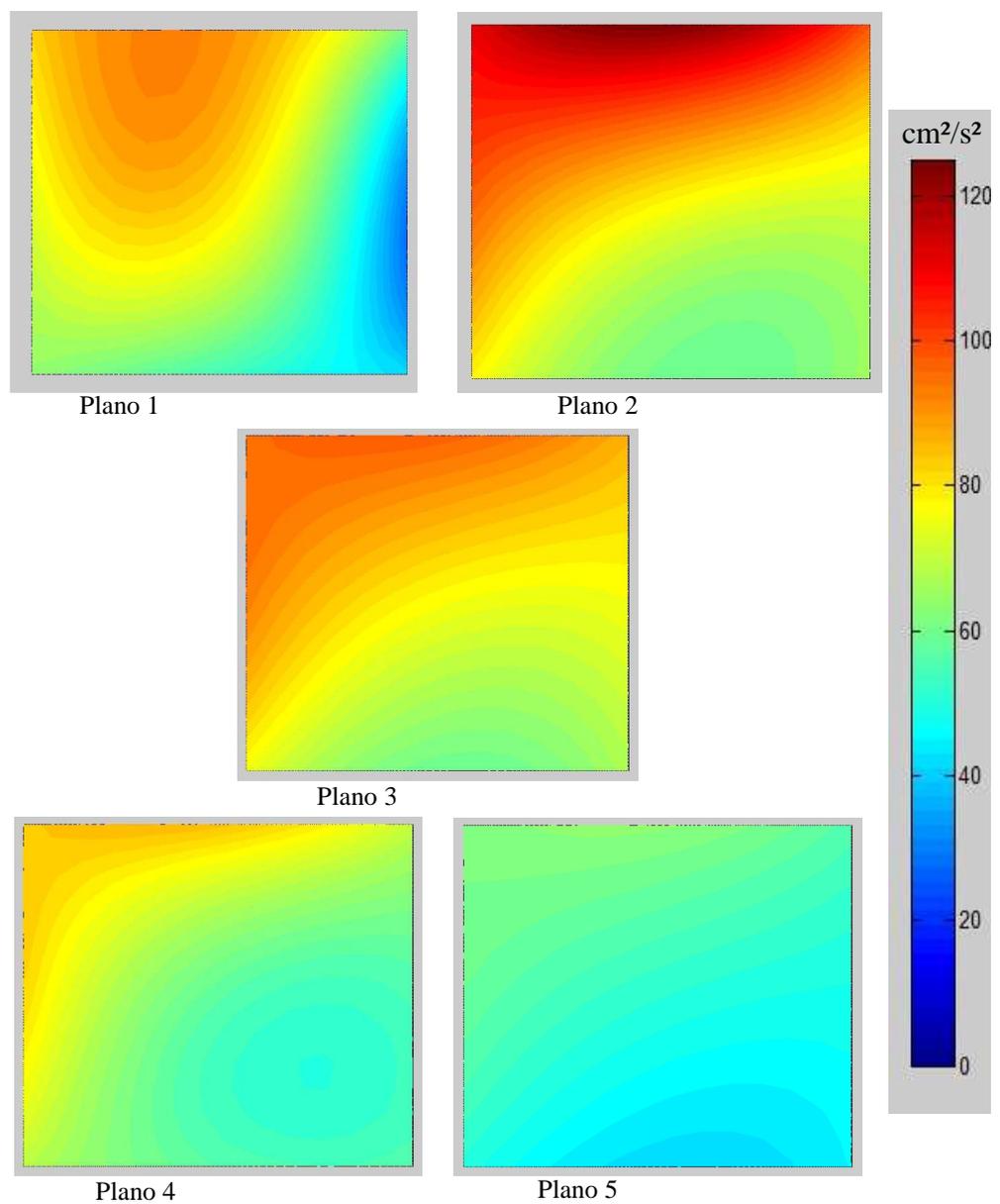


FIGURA 4.14 – Mapeamento da energia cinética turbulenta (em cm^2/s^2) ocorridas no interior do cesto de teste, para os planos 1 a 5.

4.2.3. Resultado do teste de reação

Os resultados obtidos no teste de reação constituem um conjunto de dados que caracterizam:

1. Pré-teste realizado antes da aplicação da turbulência – tempo de C máximo;
2. A aplicação da turbulência;
3. Pós-teste realizado após a aplicação da turbulência – tempo de C máximo.

A taxa de captura utilizada nas filmagens possibilitou a discretização da filmagem a cada 0,008 s (1/125). As FIGURA 4.15 e FIGURA 4.16 apresentam exemplos da análise realizada para a seqüência de reação capturada quadro a quadro para os testes de reação em mandis- amarelos realizados antes e após a aplicação de turbulência respectivamente.

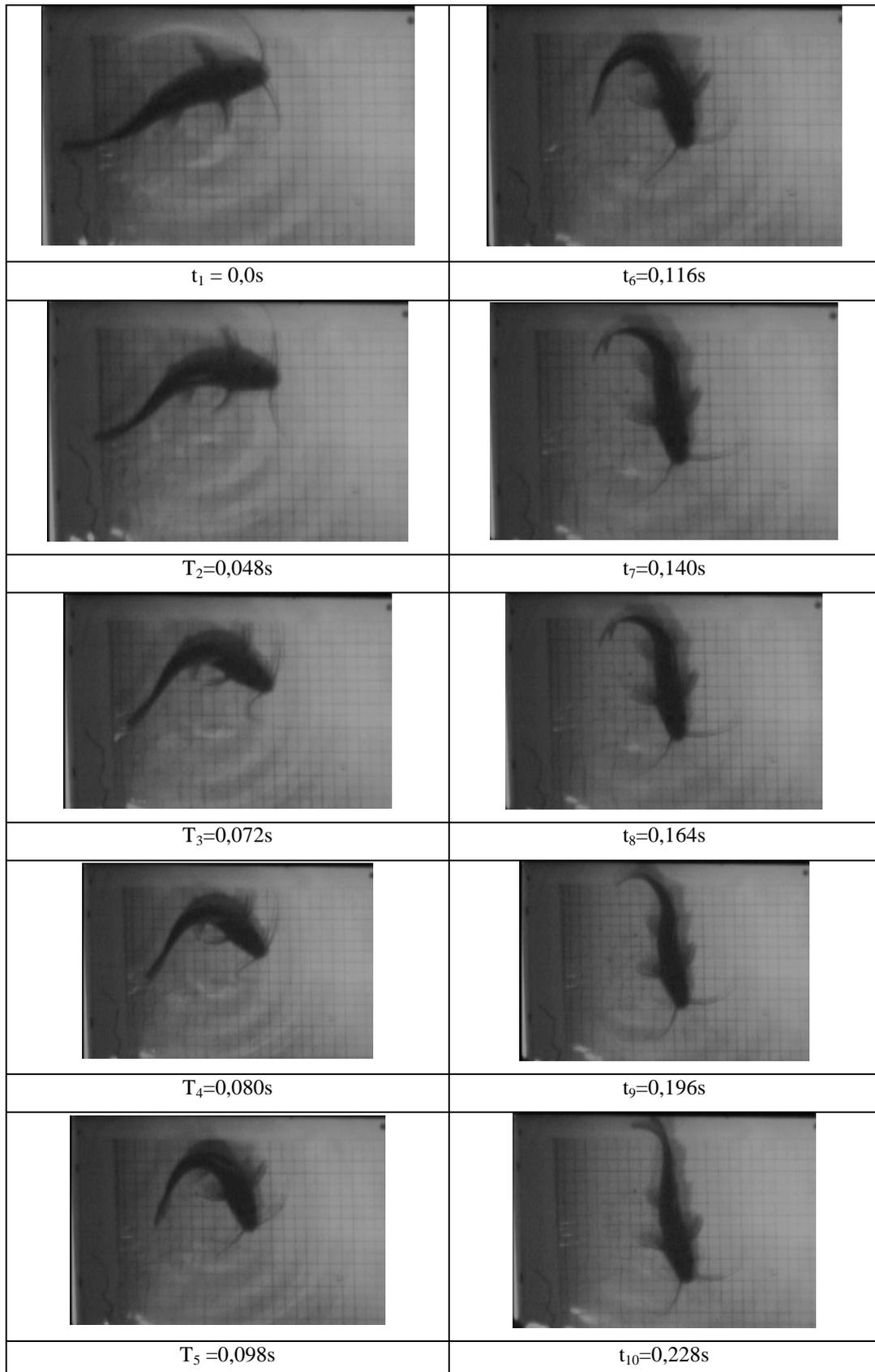


FIGURA 4.15 – Exemplo da captura quadro a quadro realizada a partir da filmagem do teste de reação antes da turbulência para espécie mandi-amarelo.

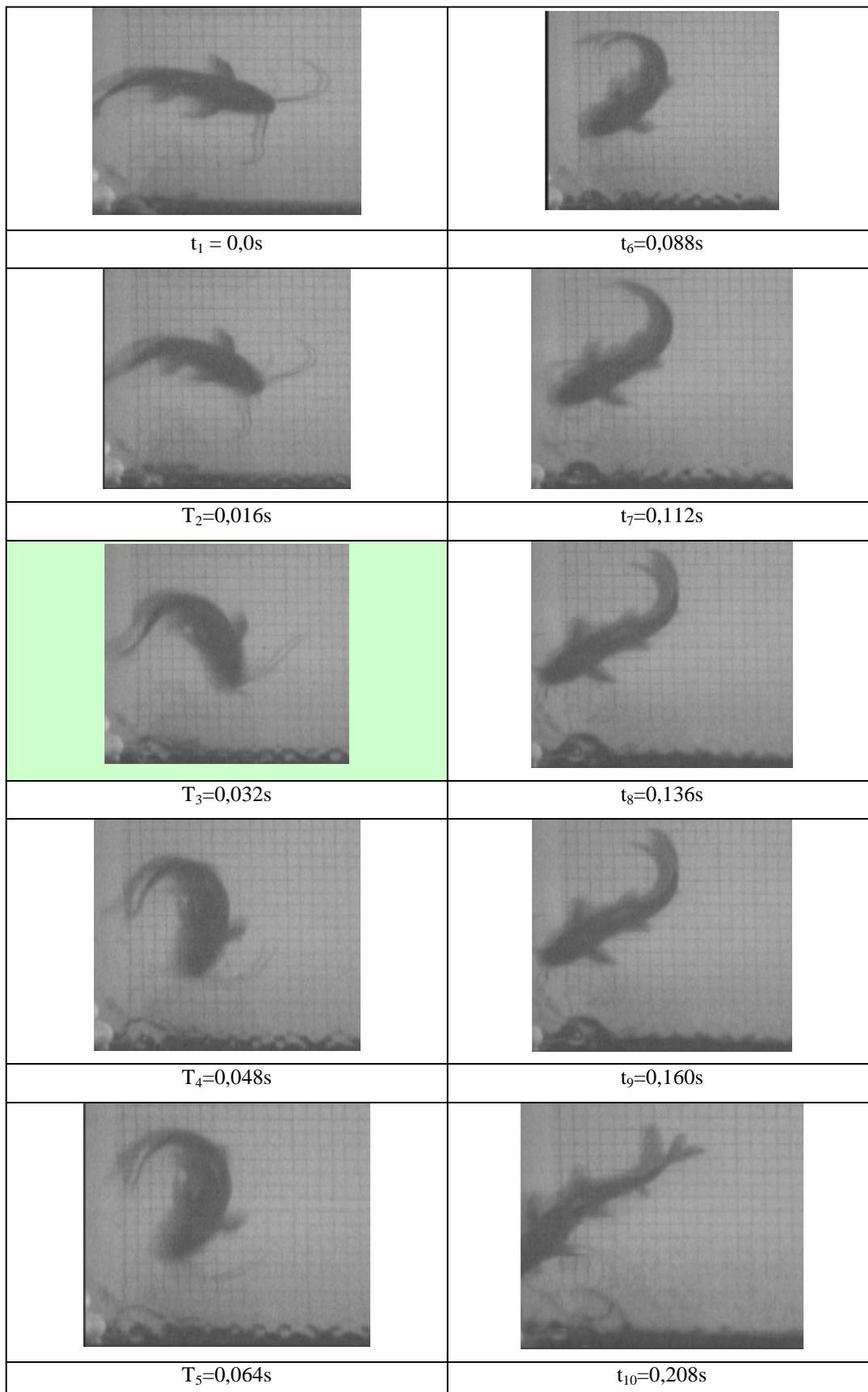


FIGURA 4.16 – Filmagem quadro a quadro do sexto teste de reação realizado nos mandis-amarelos (primeiro estímulo após a turbulência).

O intervalo $t_3 = 0,032$ s representa a máxima curvatura do peixe testado ($C_{m\acute{a}x}$).

O GRÁFICO 4.19 ao GRÁFICO 4.22 apresentam os resultados de todos os peixes utilizados no teste de reação. Os estímulos apresentados nos gráficos correspondem respectivamente aos intervalos de tempo de 15 e 20 minutos após a inserção dos peixes no aparato (pré-turbulência) e 1, 5 e 10 minutos após a aplicação da turbulência.

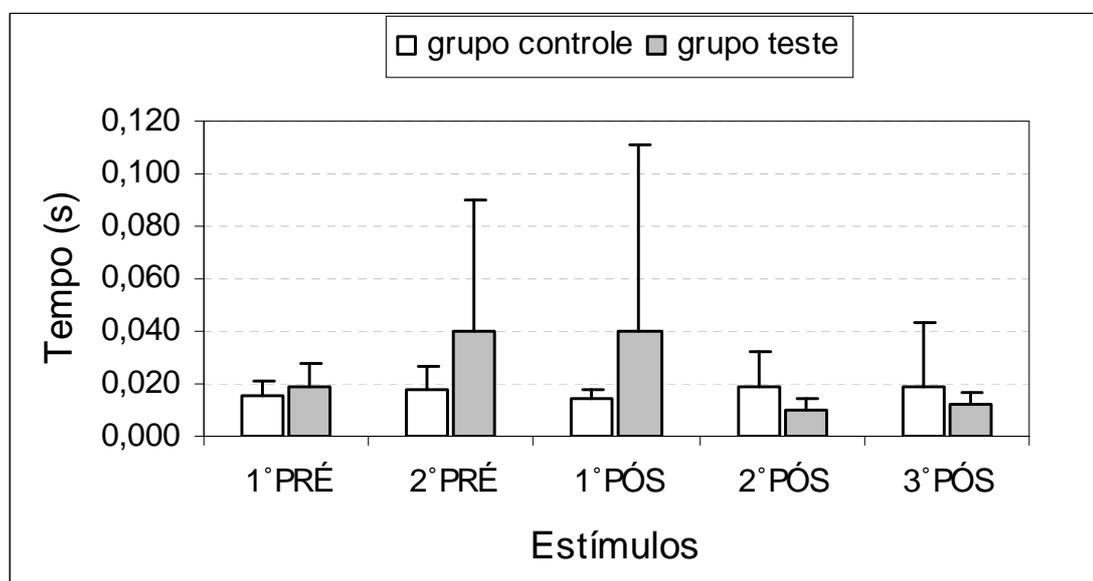


GRÁFICO 4.19– Média e desvio padrão do “tempo de reação” para todos os mandis-amarelos testados.

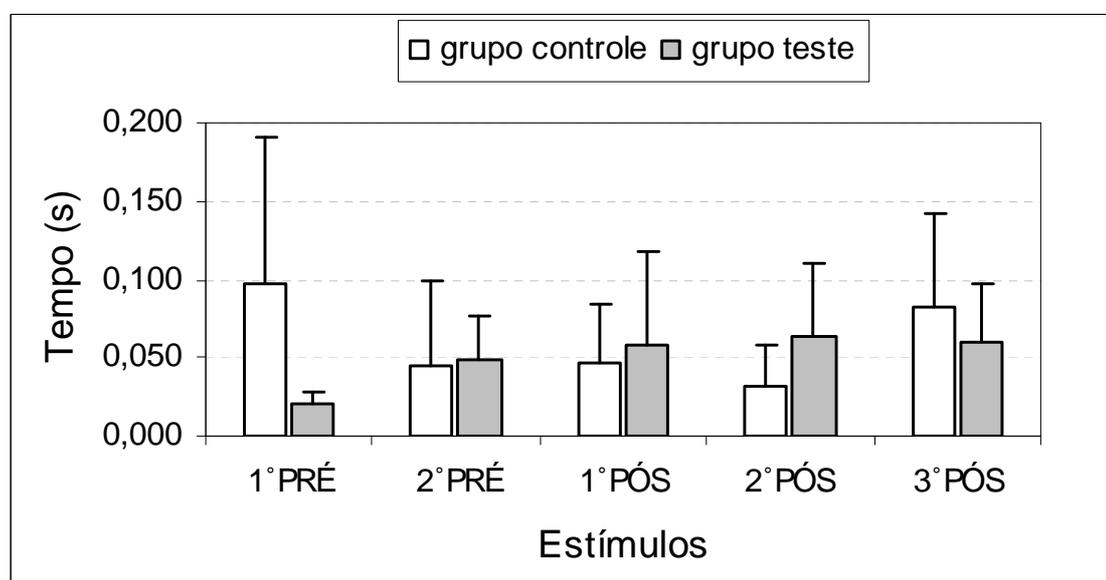


GRÁFICO 4.20 – Média e desvio padrão do “tempo para formação do C máximo” para todos os mandis-amarelos testados .

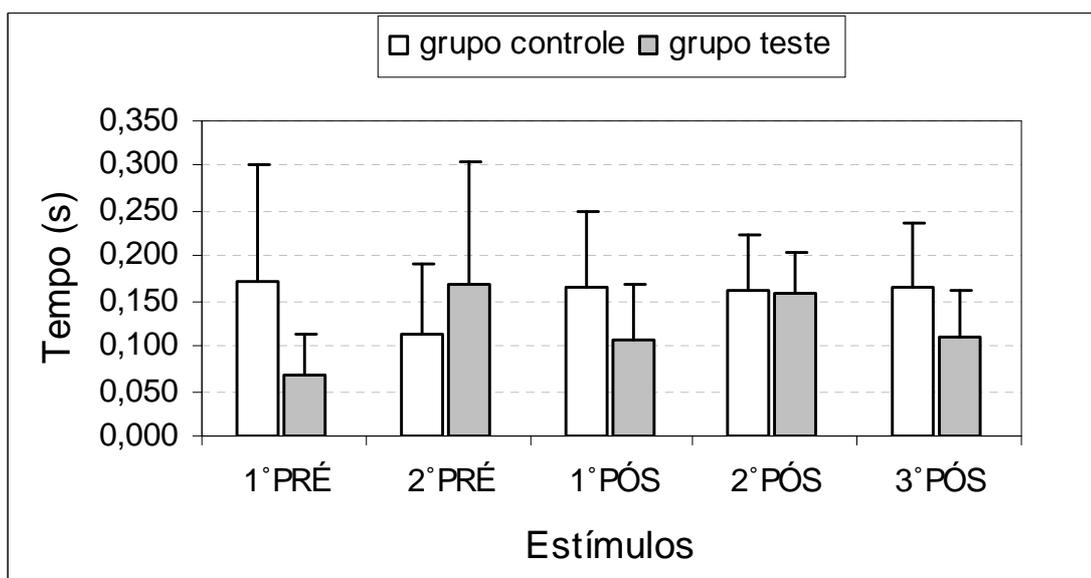


GRÁFICO 4.21 – Média e desvio padrão do “tempo de retorno” para todos os mandis-amarelos testados.

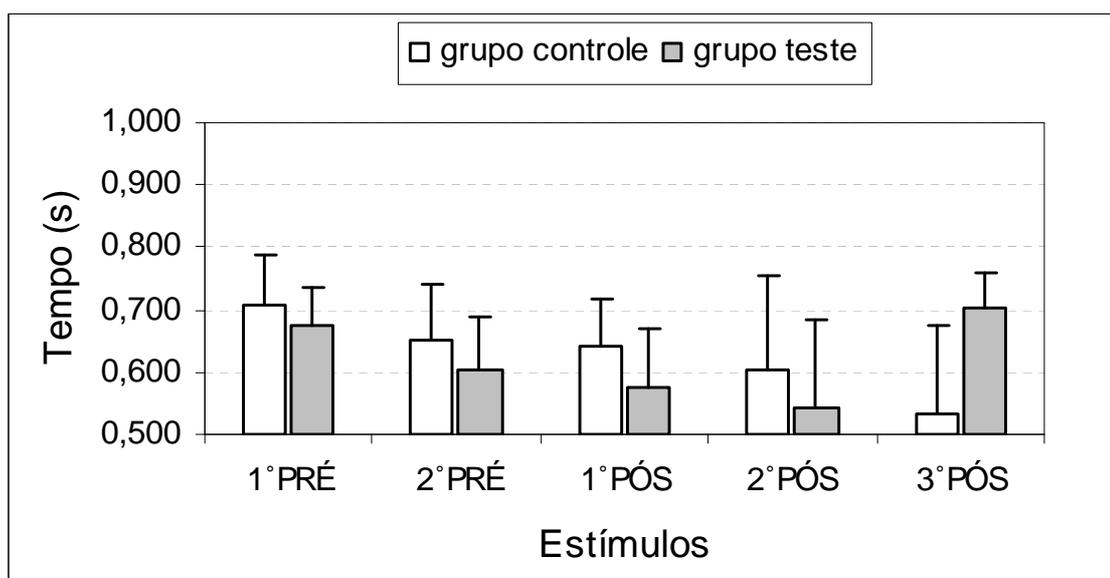


GRÁFICO 4.22 – Média e desvio padrão da “taxa de formação do C máximo” para todos os mandis-amarelos testados.

Durante a realização dos testes de turbulência foram utilizados mandis-amarelos de duas coletas diferentes. Assim a permanência no laboratório antes dos testes foram de 3 semanas e 10 meses respectivamente. A seguir são apresentados os resultados obtidos separadamente considerando o tempo de permanência em laboratório. O GRÁFICO 4.23 ao GRÁFICO 4.26 apresentam os resultados obtidos para os peixes mantidos em laboratório durante 10 meses.

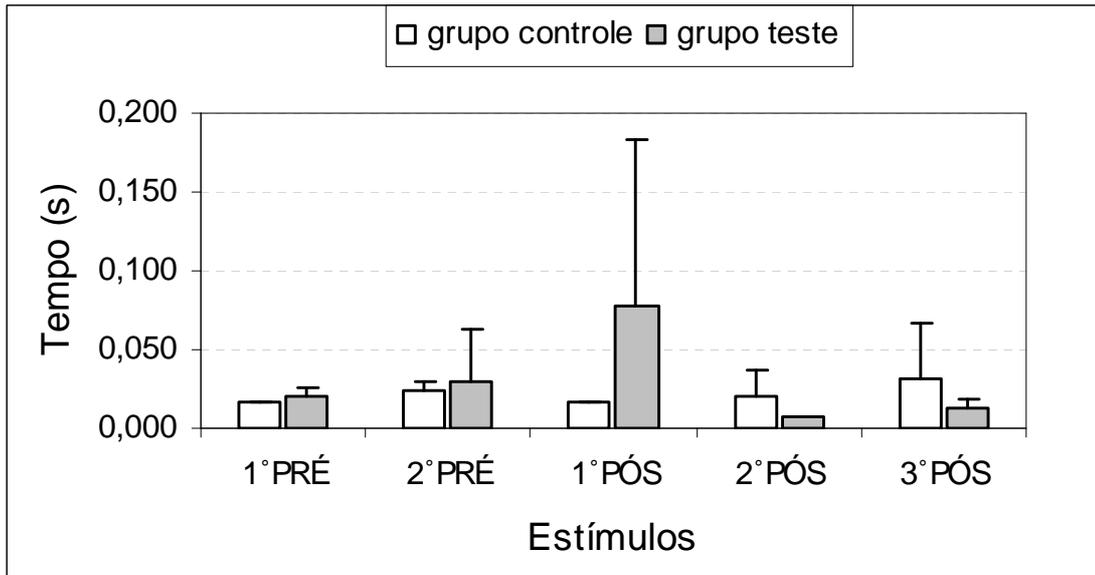


GRÁFICO 4.23 – Média e desvio padrão do “tempo de reação” para o grupo de peixes com permanência de 10 meses em laboratório.

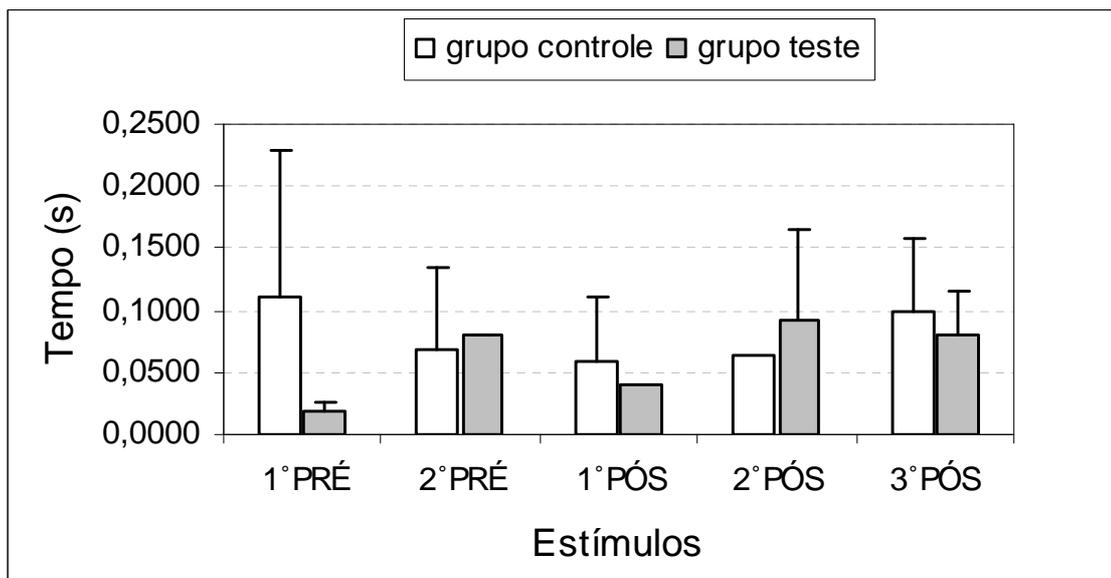


GRÁFICO 4.24 – Média e desvio padrão do “tempo para formação do C máximo” para o grupo de peixes com permanência de 10 meses em laboratório

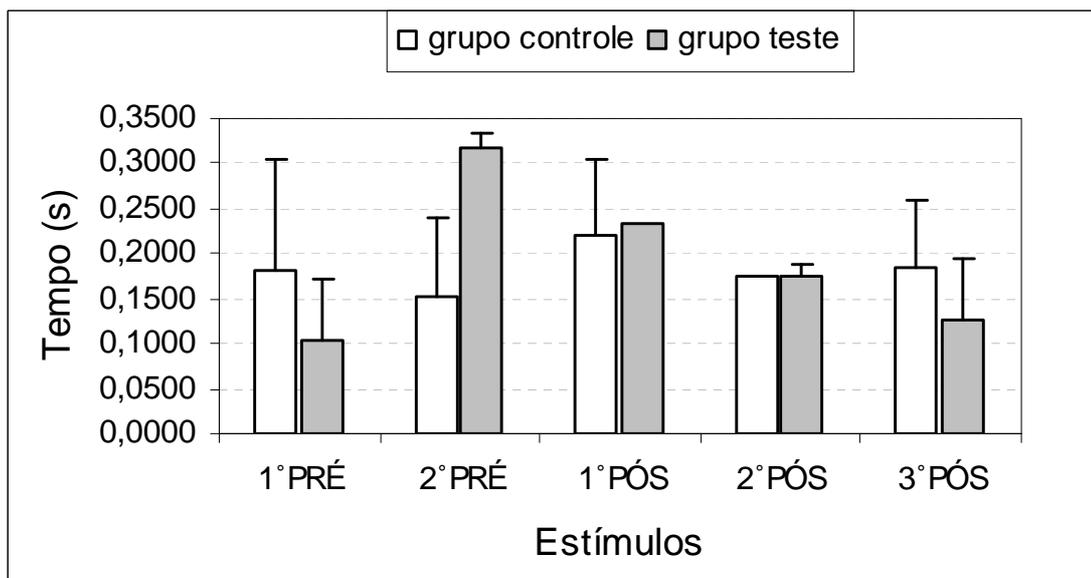


GRÁFICO 4.25 – Média e desvio padrão do “tempo de retorno” para os peixes com permanência de 10 meses em laboratório

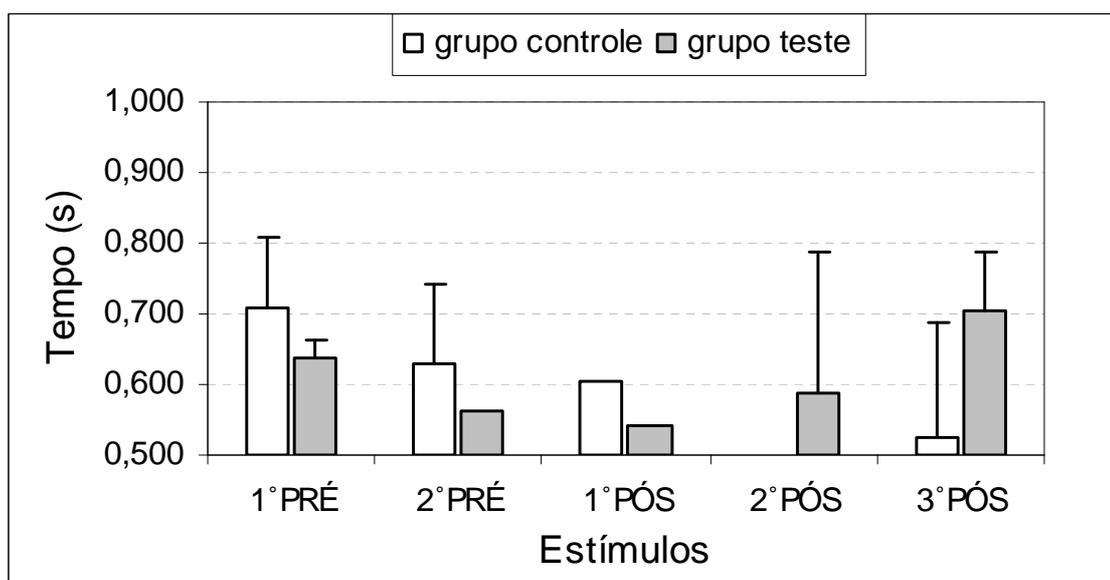


GRÁFICO 4.26 – Média e desvio padrão da “taxa de formação do C máximo” para os peixes com permanência de 10 meses em laboratório

Os GRÁFICO 4.27 ao GRÁFICO 4.30 apresentam os resultados dos peixes, mantidos em laboratório durante 3(três) semanas e que foram utilizados no teste de reação.

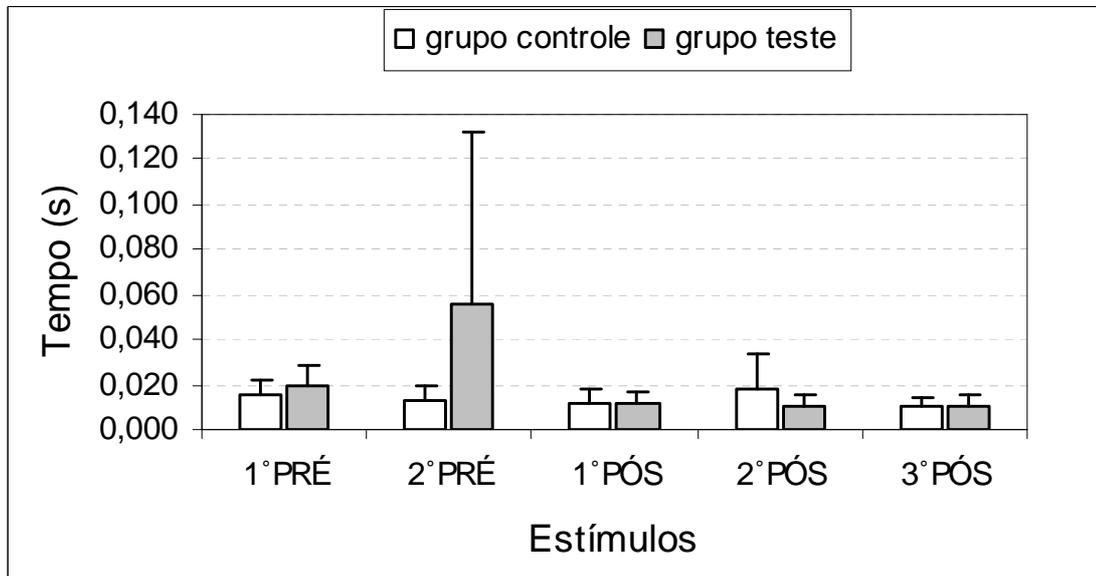


GRÁFICO 4.27 – Média e desvio padrão do “tempo de reação” para os peixes com permanência de 3 semanas em laboratório

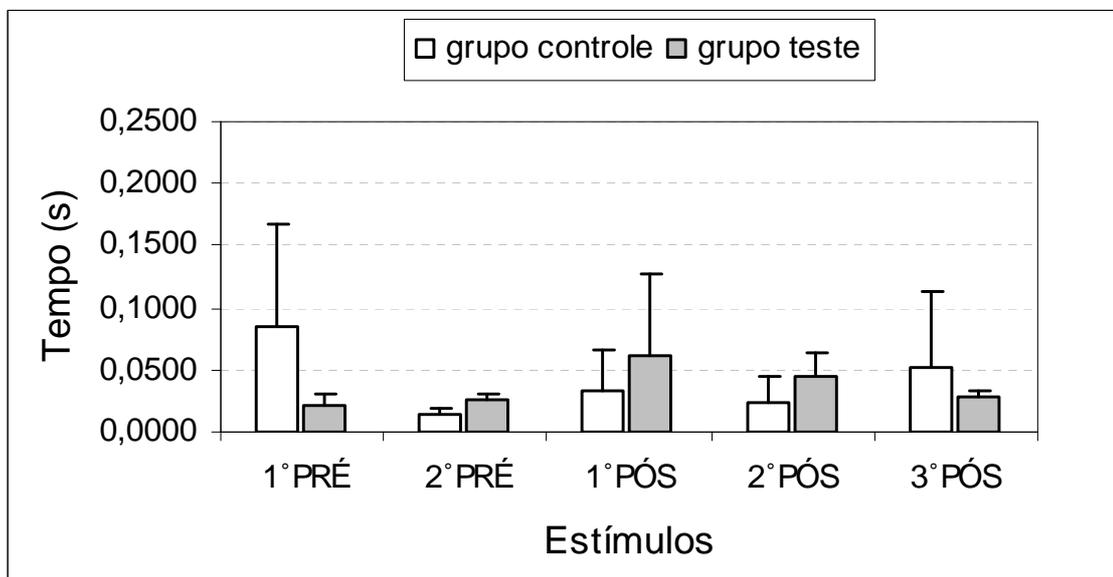


GRÁFICO 4.28 – Média e desvio padrão do “tempo para formação do C máximo” para os peixes com permanência de 3 semanas em laboratório

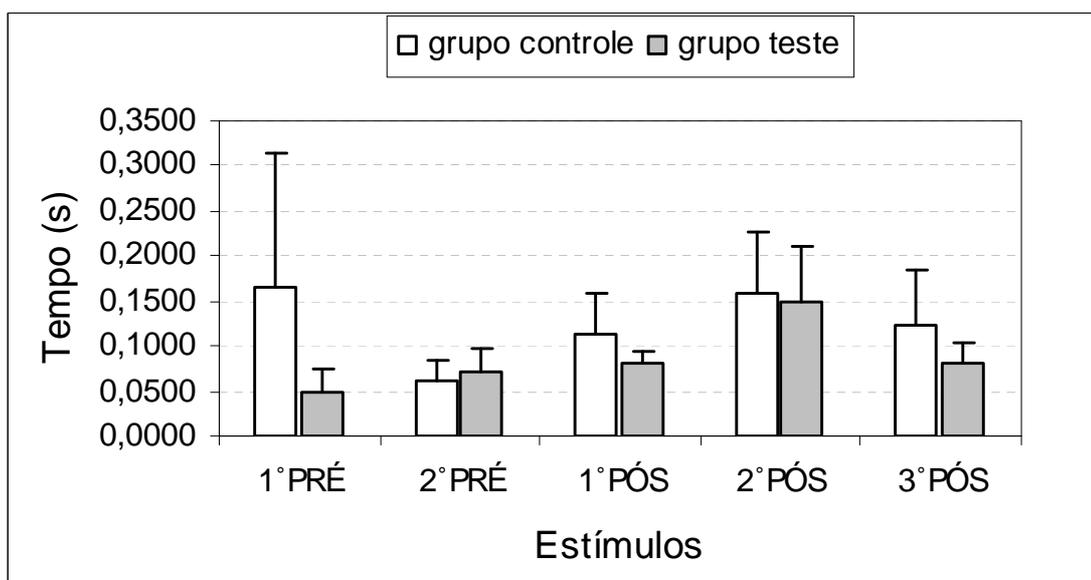


GRÁFICO 4.29 – Média e desvio padrão do “tempo de retorno” para os peixes com permanência de 3 semanas em laboratório

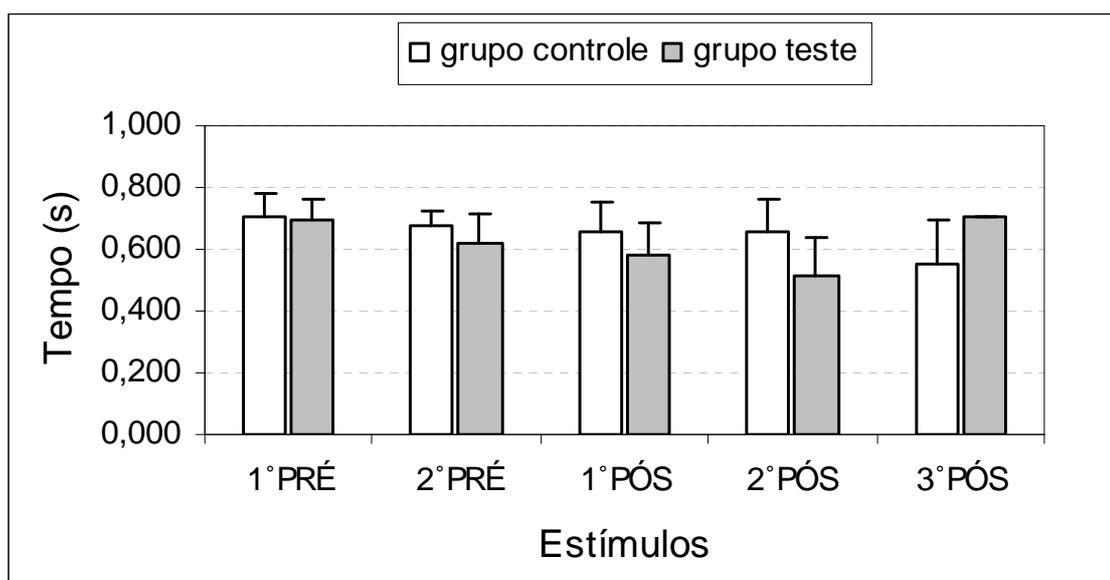


GRÁFICO 4.30 – Média e desvio padrão da “taxa de formação do C máximo” para os peixes com permanência de 3 semanas em laboratório

Foi realizada uma análise da distribuição das médias dos parâmetros de reação observados nos mandis-amarelos submetidos à turbulência. A análise pelo teste Kolmogorov-Smirnov demonstrou que as variáveis possuem distribuição normal ($p > 0,000$). Optou-se então pela utilização de testes não-paramétricos nas análises subsequentes. Com isso, utilizou-se o teste t pareado que é usado para comparar a diferença média entre duas populações quando existe uma dependência entre elas: grupo teste e grupo controle, TABELA 4.16

TABELA 4.16 – Média das reações do peixe mandi-amarelo, quando submetido à turbulência.

		Controle		Teste		N	Teste T	Valor p	CI (95%)	
		Média	DP	Média	DP				LI	LS
Tempo de reação (s)	-15	0,02	0,01	0,02	0,01	5	-1,50	0,208	-0,01	0,00
	-20	0,02	0,01	0,03	0,05	7	-0,75	0,480	-0,06	0,03
	1	0,02		0,01		1				
	5	0,01	0,01	0,01	0,00	2	1,00	0,500	-0,05	0,05
	10	0,03	0,03	0,01	0,00	3	0,98	0,431	-0,07	0,12
Tempo para formação C máximo (s)	-15	0,12	0,11	0,02	0,01	6	2,08	0,092	-0,02	0,21
	-20	0,01	0,00	0,05	0,03	5	-2,60	0,060	-0,07	0,00
	1	0,05	0,04	0,09	0,08	3	-0,63	0,593	-0,25	0,19
	5	0,01	0,01	0,04	0,02	2	-1,40	0,395	-0,28	0,23
	10	0,09	0,09	0,07	0,05	3	1,02	0,417	-0,09	0,14
Tempo de retorno (s)	-15	0,16	0,13	0,07	0,04	6	1,56	0,180	-0,06	0,25
	-20	0,10	0,09	0,17	0,13	5	-1,66	0,173	-0,18	0,05
	1	0,13	0,04	0,13	0,09	3	0,00	1,000	-0,17	0,17
	5	0,14	0,00	0,18	0,04	2	-1,29	0,421	-0,39	0,32
	10	0,17	0,09	0,13	0,06	3	1,99	0,185	-0,05	0,13
Taxa de formação do C máximo (Cmax/Ctotal)	-15	0,69	0,08	0,68	0,06	6	0,36	0,735	-0,09	0,12
	-20	0,65	0,06	0,60	0,09	4	0,78	0,492	-0,15	0,25
	1	0,66	0,09	0,58	0,00	2	1,16	0,453	-0,79	0,95
	5	0,58	0,10	0,58	0,05	2	0,05	0,971	-0,41	0,41
	10	0,61	0,09	0,73	0,06	3	-1,34	0,313	-0,47	0,25

Para turbulência não foram observadas diferenças estatisticamente significantes entre os grupos teste e controle de mandis-amarelos para nenhuma das variáveis analisadas.

Com o objetivo de permitir uma análise comparativa dos dados, optou-se por realizar também testes não-paramétricos de Kruskal-Wallis e Wilcoxon, (Devore, 2006), TABELA 4.17 e TABELA 4.18.

Para turbulência, utilizando o teste de Kruskal-Wallis (aplicável a teste de mais de 2 amostras), considerando a variável intervalo entre as observações, TABELA 4.17, não foram detectadas diferenças estatisticamente significantes entre os grupos teste e controle.

TABELA 4.17– Resultados obtidos pelo Teste de Kruskal-Wallis para os dados de turbulência – mandi-amarelo (verificação da correlação para os intervalos -15min,-20min,1min,5min e 10min)

		Controle		N	Valor p	Teste		N	Valor p
		Média	DP			Média	DP		
Tempo de reação(s)	-15	18.43	21.42	7	0.8310	20.57	20.73	7	0.1913
	-20	18.94	23.33	9		19.50	21.72	8	
	1	15.88	17.10	4		16.43	20.73	7	
	5	16.83	20.21	6		9.50	16.59	4	
	10	13.86	21.42	7		12.50	19.58	6	
Tempo para formação C máximo (s)	-15	20.33	24.53	9	0.4241	5.83	16.98	6	0.0644
	-20	13.83	24.53	9		14.90	15.87	5	
	1	15.87	17.98	4		15.42	16.98	6	
	5	13.10	19.75	5		18.10	15.87	5	
	10	20.75	21.25	6		17.10	15.87	5	

Aplicando o teste de Wilcoxon, considerando agora a variável grupo, e realizando a verificação para cada tempo de observação, também não foram detectadas diferenças significativas, TABELA 4.18.

TABELA 4.18– Teste de Wilcoxon para os dados de turbulência – mandi-amarelo (verificação da correlação entre o Grupo Controle e Teste para os testes de reação pós turbulência)

		Controle		N	Teste		N	Valor p
		Média	DP		Média	DP		
Tempo de retorno (s)	1	5.25	4.68	4	5.67	4.67	6	0,830
	5	4.40	4,71	5	6.60	4,71	5	0,243
	10	6,67	5,48	6	5,20	5,48	5	0,465
Tempo de reação	1	5,88	4,92	4	6,07	4,92	7	0,919
	5	6,17	4,15	6	4,50	4,15	4	0,335
	10	7,00	6,23	7	7,00	6,23	6	1,000

Optou-se, portanto pela verificação do “tempo de retorno” e da “taxa de variação do C máximo” pelo procedimento GLM do software de estatística SAS. Nessa análise, TABELA 4.19, verifica-se uma diferença estatística significativa para as classes grupo (controle e teste) e cativoiro (antigo e recente), no intervalo de tempo um minuto após o teste (correspondente ao “tempo de retorno”). Para os demais tempos não foram observadas diferenças significativas. Já para a “taxa de formação do C máximo”, verifica-se a existência de diferença estatística significativa na classe grupo, para a observação no intervalo de 10 min após o teste ($p=0,046$).

TABELA 4.19- Verificação do “tempo de retorno” e da “taxa de variação do C máximo”, utilizando o procedimento GLM software SAS, para duas classes (Grupo e Cativoiro)

	Classes	Tempo min	Média	N	Observações Utilizadas	Valor de p
Tempo de retorno (s)	Grupo (Controle e Teste)	1	0,0154	20	10	0,039
		5	0,0002	20	10	0,841
		10	0,0153	20	11	0,178
	Cativeiro (Antigo e Recente)	1	0,0482	20	10	0,003
		5	0,0022	20	10	0,514
		10	0,0128	20	11	0,212
Taxa de formação do C máximo	Grupo (Controle e Teste)	1	0,0102	20	9	0,320
		5	0,0103	20	10	0,525
		10	0,0787	20	11	0,046
	Cativeiro (Antigo e Recente)	1	0,0033	20	9	0,562
		5	0,0066	20	10	0,608
		10	0,0003	20	11	0,884

5. ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presença de barramentos hidroenergéticos torna as condições ambientais para os peixes migradores muito adversas. O grande volume de água que entra pela tomada d'água pode fazer com que, dependendo do arranjo da usina, os peixes sejam atraídos ou arrastados a entrarem na casa de máquinas, podendo sofrer muitos danos quando passam pelas turbinas. Dentre as causas destes danos se destaca a brusca variação de pressão, principalmente no interior da máquina.

O trabalho realizado contemplou o levantamento de uma ampla revisão bibliográfica, na qual se procurou abranger várias questões referentes às condições hidrodinâmicas desfavoráveis à ictiofauna presentes em usinas hidrelétricas.

A partir da revisão bibliográfica optou-se por estudar o efeito de duas condições hidrodinâmicas desfavoráveis à sobrevivência de espécies brasileiras encontradas em usinas hidrelétricas: a permanência em condições de turbulência, características encontradas principalmente na saída do tubo de sucção; e a variação brusca de pressão quando da passagem pelo circuito da turbina.

As técnicas utilizadas na metodologia e os aparatos experimentais construídos mostraram-se adequados para a avaliação dos danos causados a algumas espécies de peixes estudadas, associados às condições de variação de pressão e turbulência encontradas quando da passagem por turbinas e regiões adjacentes.

As bancadas para os testes de exposição aos efeitos de variação de pressão e de turbulência sofreram muitas intervenções com o intuito da adequação às metodologias propostas. A proposição de uma nova bancada para os testes de pressão, por exemplo, em substituição ao aparato vertical foi resultado das adequações implantadas para a melhoria do estudo. A partir dos resultados preliminares obtidos nos testes de comissionamento dos aparatos também foram possíveis observações e intervenções nos procedimentos adotados. Os resultados obtidos, após a modificação e ajustes dos aparatos, retratam as limitações e dificuldades que se encontram na análise experimental realizada em laboratório.

Foram realizados testes com os aparatos de pressão e de turbulência para grupos de peixes da espécie *Mandi-amarelo* (mandi-amarelo-amarelo), representante dos siluriformes e espécie de peixes da ordem dos characiformes, *Astyanax bimaculatus* (lambari do rabo amarelo). Os testes realizados, exceto os testes com o aparato vertical e os testes preliminares no aparato horizontal, utilizaram dois grupos de tratamento: controle e teste.

- **Variação de pressão**

Variação de pressão durante a passagem por turbina e os cenários de variação simulados pelo aparato – O aparato horizontal de pressão, após os ajustes mecânicos e implementação do sistema de aquisição de dados, permitiu a realização dos ensaios previstos, realizando uma simulação muito próxima da apresentada na revisão bibliográfica, correspondente à aplicação da variação de pressão a partir da superfície e tomada d'água, passagem pelo rotor da turbina e restituição da pressão atmosférica no tubo de sucção.

Observações quanto ao comportamento dos peixes durante os testes de pressão - Percebeu-se que, ao longo da execução dos ensaios com o grupo teste, os indivíduos no momento da descompressão súbita se tornavam inquietos e se posicionavam na parte superior da câmara de teste, tendo logo após a descompressão um momento de agitação e perda de equilíbrio (barriga para cima ou cabeça para baixo e desorientação). Como produto dos testes de variação de pressão realizados, gerou-se um banco de dados com todas as filmagens para o momento da descompressão. Estes vídeos poderão ser objeto de análise futura para a caracterização do comportamento dos mandi-amarelos e dos lambaris durante o momento de aplicação do transiente de pressão.

Resultados obtidos -

A partir da análise estatística dos resultados dos testes de pressão, apresentada no capítulo anterior, podem-se apresentar as seguintes considerações:

- Percebe-se que a variação brusca de pressão provocou, de forma efetiva, alguns danos nos indivíduos testados, entretanto observou-se que os danos imediatos podem provocar uma maior susceptibilidade à predação, visto que, os indivíduos perdem momentaneamente a capacidade de orientação e equilíbrio, ficando de barriga para cima ou de cabeça para baixo.

- Para a espécie *Astyanax bimaculatus*, lambari, submetida à descompressão súbita de 50 a -8 m.c.a., observou-se a ocorrência de 8% de morte para o grupo teste após 24 horas e 0% para o grupo controle. Quanto à ocorrência de hemorragia, observou-se 83% para o grupo teste no intervalo de 1 h após o teste reduzindo para 67% em 48 h após o teste. Enquanto o grupo apresentou uma ocorrência constante de 8% para todos os intervalos de observação. Para a variável exoftalmia verificou-se a ocorrência de 67% logo após o teste (0h). Este sintoma teve sua ocorrência reduzida para os próximos intervalos não sendo mais observado 48 horas após o teste. Ocorrem bolhas em 48% dos lambaris testados logo após o teste. Este valor decaiu para 8% no intervalo de 48 horas. Observou-se também que 42% dos lambaris testados apresentaram danos imediatamente após o teste reduzindo para 8% em 48 horas. Os dados apresentados mostraram a que os lambaris são sensíveis à variação brusca de pressão principalmente nas primeiras horas após o teste de descompressão. Após intervalos iniciais observa-se uma recuperação parcial nos sintomas para os intervalos subsequente até as 48 horas. As análises estatísticas realizadas confirma a diferença significativa entre os grupos controle e teste para a hemorragia, exoftalmia e ocorrência de bolhas.

- Observou-se a presença de hemorragia externa em 7% dos indivíduos testados da espécie *Mandi-amarelo*, que após o período de 1 hora desapareceu. Inicialmente, na retirada dos indivíduos testados da câmara de teste, não foram observados nenhum dano, entretanto, observações sucessivas realizadas nesses indivíduos, revelou uma maior predisposição a fungos que após 48 horas foram percebidos em 47% dos indivíduos do grupo teste e em 20% dos indivíduos do grupo controle para o teste de descompressão de 30 a -8 m.c.a. Para o teste de descompressão de 50 a -8 m.c.a, observou-se tanto para a variável hemorragias quanto para a ocorrência de danos um aumento significativo entre a observação logo após o teste e os intervalos subsequentes, variando respectivamente de 33% a 57% e de 27% a 67%. Este aumento nos sintomas pode estar relacionado à pré-disposição à ocorrência de fungos e ataques de bactérias decorrentes da redução da resistência e imunidade.

- A comparação dos grupos mandi-amarelo e lambari submetidos à descompressão de 50 a -8m.c.a apresentou o maior número de análise com diferenças estatisticamente significantes para $p < 0,05$. Foram observadas diferenças significativas para a ocorrência de hemorragias, exoftalmia, danos e presença de bolhas. Este resultado confirma a expectativa de que os peixes da ordem dos Siluriformes, como o mandi-amarelo amarelo testado, geralmente adaptados a maiores profundidades, seriam mais resistentes à variação de pressão do que os

peixes da ordem dos Characiformes, como o lambari. Outra diferença significativa entre as duas espécies testadas, que poderia justificar os diferentes efeitos, está relacionada ao fato dos mandi-amarelos serem peixes ditos “de couro” e os lambaris de escamas.

- A taxa máxima de variação da pressão obtida no aparato, a partir da descompressão de 50 a -8 m.c.a. é em média 340 m.c.a./s, conforme mostrado no GRÁFICO 3.2. Esta taxa foi obtida a partir da compilação dos sinais obtidos durante a simulação do histórico pelo sistema de aquisição de dados e corresponde a variação de 50 a 0 m.c.a no intervalo médio de 0,147 segundos. Percebe-se que esta taxa de descompressão é muito superior à adotada como parâmetro de projeto para as chamadas turbinas “amigáveis”, conforme apresentado no Capítulo 2 (TABELA 2.2.). Odeh (1999) afirma que segundo *ARL/NREC* é adotado como parâmetro de referência a variação máxima de até 55,0 m.c.a./s (550 kPa/s). No entanto, os mandis-amarelos testados mostraram-se bem mais resistentes do que as espécies de clima temperado quanto comparados a porcentagem de danos e mortes ocorridas em testes em laboratório.

Observações de danos internos - dissecação

Além dos testes de pressão e turbulência foram realizadas algumas dissecações de mandi-amarelo amarelo e lambari do rabo amarelo. A realização destas dissecações objetivou a caracterização qualitativa dos possíveis efeitos internos do teste de pressão, principalmente quanto à ocorrência de bolhas de ar ou hemorragias visíveis a olho nu e traumas na bexiga natatória das espécies testadas. Os danos observados confirmaram o disposto na literatura, quanto à possibilidade de ocorrência de tais efeitos, sendo também observados em alguns indivíduos das espécies tropicais estudadas.

Apesar do pequeno número de peixes dissecados, pôde-se perceber que a descompressão súbita provocou aparentemente a ruptura da bexiga natatória em 29% dos mandis-amarelos avaliados. Observou-se também que 79% dos indivíduos apresentaram a região retroperitoneal inflada e 29% apresentaram uma recuperação progressiva da bexiga natatória. Acredita-se que os danos causados a estas estruturas internas podem contribuir para a redução da resistência à médio prazo, tornando-os mais susceptíveis a doenças, ataques por fungos/bactérias e predação. Apesar do fato de alguns indivíduos testados apresentarem, em alguns casos, o rompimento da bexiga natatória, percebe-se que este dano se tornou pouco relevante para a sobrevivência do indivíduo após o teste em laboratório. Cabe ressaltar, que estas dissecações

tiveram um caráter qualitativo, não descartando a necessidade de aprofundamento específico para a caracterização e quantificação dos danos às estruturas internas dos peixes.

- **Testes de Turbulência**

Validação da metodologia - A metodologia desenvolvida mostrou-se adequada, possibilitando a observação e quantificação da variação da reação antes e depois do teste de turbulência. Foi possível o levantamento da turbulência na capacidade de reação em termos das variáveis descritas pela literatura: ocorrência ou não de reação ao estímulo, tempo para primeira reação, formação do C máximo, tempo do C máximo até o final do estágio 2 e a taxa de formação do C .

Os peixes foram submetidos a uma energia cinética turbulenta que variou de $29 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ no plano 1 (mais próximo ao fundo do aparato) até valores máximos de $124 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ encontrados no plano 2 a 10 cm do fundo do cesto de confinamento. Durante o teste de turbulência, os mandis-amarelos testados apresentaram um comportamento variado em relação ao posicionamento no interior do cesto, entretanto percebeu-se uma tendência para a permanência em área de menor turbulência e preferencialmente com a cabeça no sentido contrário às velocidades encontradas no plano xy.

Efeitos da permanência em turbulência e a alteração na capacidade de reação – O teste de reação, aplicado à uma amostra total de 30 mandis-amarelos (15 controle e 15 teste) após a permanência do indivíduo testado em ambiente turbulento por 30 minutos não apresentou evidências estatísticas, a um nível de confiabilidade de 95%, que comprovem os danos ao grupo de indivíduos testados quando comparados ao grupo controle para as variáveis de reação medidas. Entretanto, para as variáveis “tempo de retorno” ($p=0,039$ - primeiro estímulo após o teste) e “taxa de formação do C máximo” ($p=0,046$ – terceiro estímulo após o teste), verifica-se uma diferença estatisticamente significativa, o que aponta para uma possível influência da turbulência na reação dos peixes testados.

Os efeitos provocados pela turbulência, nos níveis estudados, quando considerada isoladamente, não puderam ser estatisticamente comprovado, mas aponta para um possível aumento na susceptibilidade dos mandis-amarelos testados à predação devido às diferenças de reação encontradas. Sugere-se a realização deste ensaio, com um maior número de

indivíduos, considerando a ação conjunta dos efeitos de pressão, com o objetivo de verificar se os impactos e danos, nos indivíduos, se alteram substancialmente.

Propostas de melhorias na metodologia e técnicas

Com o desenvolvimento dos trabalhos, foram detectadas algumas possíveis melhorias a serem futuramente implantadas:

Aparato de testes de pressão horizontal :

-A utilização da bomba multi-estágio para geração de pressão empregado, apresentou uma limitação quanto a faixa de operação de variação a ser empregada. Além disto, a capacidade de regulação instantânea da pressão desejada estava diretamente relacionada ao transiente/amortecimento imposto pelo circuito hidráulico. Sugere-se que seja avaliada a substituição do sistema hidráulico por um sistema de pistão, de forma a melhorar as condições para a repetibilidade e facilitar a variação dos níveis de pressão na câmara de teste.

-Outra sugestão para o aprimoramento do aparato, trata-se do aumento da seção de teste. Esta intervenção está relacionada à possibilidade de se testar maiores indivíduos e a realizar testes em grupos. Para esta intervenção, sugere-se a troca da câmara de teste por uma de maiores dimensões, ampliando as espécies e tamanhos a serem testados.

-Conforme apresentado no capítulo de revisão bibliográfica, os aparatos desenvolvidos para a caracterização dos efeitos de pressão mais recentemente desenvolvidos, incorporaram o controle da supersaturação dos gases dissolvidos da água que é utilizada nos testes (Neitzel *et al.*, 2004). Assim sugere-se que seja implantado um sistema para controle da oxigenação do aparato e instalação de sensores de medição de OD (saturômetros).

Aparato de turbulência e metodologia de medição da reação:

A utilização do aparato de turbulência requer que se mantenha o indivíduo, no momento do teste, com as mesmas condições de temperatura dos tanques de observação.

Como foi utilizada para geração do ambiente turbulento, uma bomba centrífuga em um sistema fechado, a temperatura tinha a tendência de se elevar rapidamente. A solução foi permitir que o aumento de temperatura fosse dissipado ao longo do ensaio, para isto teve-se

que realizar o ensaio com monitoramento da temperatura através da substituição parcial da água de teste. Os procedimentos foram seguidos igualmente para os dois grupos testados: controle e teste. Sugere-se o estudo de um novo sistema gerador de turbulência, capaz de manter a temperatura adequada para os ensaios de forma mais simples.

- Como as análises estatísticas, para os mandis-amarelos, não apontaram para existência de diferenças significantes entre os grupos teste e controle (para a amostra testada), sugere-se a repetição dos procedimentos de ensaio, utilizando a metodologia desenvolvida aplicada e realizando a verificação da necessidade de uma amostra maior através do cálculo do poder da amostra piloto utilizada.

- Para realização do estímulo, foi utilizada uma haste metálica que provocava uma vibração próxima ao mandi-amarelo, sugere-se o desenvolvimento de um sistema automatizado para geração do estímulo para a reação, a fim de minimizar a influencia da presença humana no entorno do aparato.

- Uma melhoria no processo de transição do indivíduo da seção de estímulo para a seção de turbulência se faz necessária, de forma à minimizar os efeitos da manipulação. Sugere-se a realização do estímulo e da turbulência em uma mesma seção, ambos com condições de monitoramento das grandezas e variáveis envolvidas.

ABSTRACT

Dams can block fish movements and alter water quality and stream flows. Impoundments and flow releases from hydropower facilities can adversely affect the aquatic life passing upstream, downstream, and through the sites, especially for migratory species. Fishways have been developed to provide both upstream and downstream passage and minimize the interruption of fish migratory movements. Experience has shown that passage through hydraulic turbines and over spillways was considered to be a particularly important cause of damage to downstream migrating fishes. Injuries and mortality among fishes passing through a hydroelectric turbine can result from several mechanisms, including rapid and extreme water pressure changes, cavitation, shear, turbulence, and mechanical injuries. Each of these mechanisms can cause physical injuries that are severe enough to kill the fish directly; these include descaling; loss of the protective mucous layer; torn gill covers; decapitation; bruises; burst swim bladder; haemorrhaging; and other internal injuries. If the entrainment stresses are not immediately lethal, the fish may nonetheless be physiologically stressed and disoriented, so that they are more susceptible to predation in the tailwaters. However, data on the responses of fishes to these levels of stress are frequently lacking and inexistent for Brazilian species. In response to the goal of developing an improved understanding of the mechanisms of fish mortality and injury associated with hydropower components, this work proposed the design and construction of experimental apparatus and the experimental methodology to study the influence of pressure and turbulence on tropical fish species. Two fish species were tested: *Pimelodus maculatus*, the yellow mandi (*Siluriform* order) and *Astianax bimaculatus*, the lambari do rabo-amarelo (*Characiform* order). Biological responses were measured in terms of direct injuries occurrence (short-term and long-term) during laboratory experiments. Biological response from the experimental turbulence exposure was measured in terms of direct injuries and changes in response capacity that might alter susceptibility to predation. It is expected that the results of the studies will be used to develop biologically based criteria that could be used by regulators and in the design of turbine systems, bypass systems, and for hydropower plant operation procedures.

Key words: *fishways, hydraulic variables, pressure, turbulence, downstream migration, turbine fish passage.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABERNETHY, C.S., AMIDAN, B.G., & CADA, G.F. (2001). “Laboratory Studies of the effects of Pressure and dissolved gas supersaturation on Turbine-passed fish” – DOE / ID-10853, U.S Department of Energy, Idaho Operations Office, Idaho Falls, ID.
2. ABERNETHY, C.S., AMIDAN B.G., & CADA, G.F. (2002). “Simulated passage through a modified Kaplan Turbine pressure regime: A supplement to Laboratory Studies of the Effects of Pressure and Dissolved Gas Supersaturation on Turbine-Passed Fish”. PNNL-13470-A. Report to the U.S. Department of Energy Hydropower Program. Idaho Falls, ID.
3. ABERNETHY, C.S., AMIDAN, B.G., & CADA, G.F. (2003). “Fish Passage Through a Simulated Horizontal Bulb Turbine Pressure Regime: A Supplement to Laboratory Studies of the Effects of Pressure and Dissolved Gas Supersaturation on Turbine-Passed Fish”. PNNL-13470-B, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
4. AGENDA 21 (1992). “Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento”, Rio de Janeiro: 1992. Disponível em <www.mma.gov.br> acessado em: 05/05/08.
5. AGOSTINHO, A.A., JÚLIO JR., H.F. & BORGHETTI, J.R. (1992). “Considerações sobre os impactos dos represamentos na ictiofauna e medidas para sua atenuação. Um estudo de caso: reservatório de Itaipu”. Revista Unimar, Maringá, v.14, p. 89-107.
6. AGOSTINHO, A.A., VAZZOLER, A.E.A. & THOMAZ, S.M. (1995). “The high River Paraná basin: limnological and ichthyological aspects”. *In: Limnology in Brazil* (eds J.G.Tundisi, C.E.M.Bicudo), Brazilian Academy of Sciences, Brazilian Limnological Society, pp.59-103.
7. ALEXANDER, R. M. (1993). “Buoyancy”. *In: Evans DH (ed) The physiology of fishes*. CRC Press, Boca Raton, Florida.

8. ALVES, C. B. M. & POMPEU, P. S. (2001). “Peixes do rio das Velhas: passado e presente”. Belo Horizonte, Segrag. 192p.
9. AMBIENTE BRASIL (2004). “Mortandade de Peixes Paralisa Usina de Funil em MG”, publicado em 30/01/2004, disponível em <http://noticias.ambientebrasil.com.br/noticia/?id=13516>. Acessado em novembro/2009.
10. ANDRADE, P. M. & BRAGA, F. M. S. (2005). “Reproductive seasonality of fishes from lotic stretch of the Grande River, High Paraná River Basin, Brazil”. *Brazilian Journal of Biology* 65, 387-394.
11. BAIGÚN, C. R. M., NESTLER, J. M., OLDANI, N. O., GOODWIN, R. A., & WEBER, L. J. (2007). “Can North American fish passage tools work for South American migratory fishes?”. *Neotropical Ichthyology* 5(2), 109-119.
12. BATTY, R.S., BLAXTER, J.H.S. & FRETWELL, K. (1993). “Effect of temperature on the escape response of larval herring”, *Clupea harengus*. *Marine Biology*, 115, 523-528.
13. BECKER, J.M., ABERNETHY, C.S., & DAUBLE, D.D. (2003). “Identifying the effects on fish of changes in water pressure during turbine passage”. *Hydro Review*. Volume XXII, Number 5, pp. 32-42.
14. BELL, M. C. (1973). “Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria”, U.S Army of Engineers., North Pacific Div., Portland, Oregon., 490pp.
15. BELL, M. C., DELACY, A. C., PAULIK, G. J., BRUYA, K. J., & SCOTT, C. T. (1981). “Updated compendium on the success of passage of small fish through turbines”. Report to U.S. Army Corps of Engineers, Contract DACW-6P-76-C-0254.
16. BERNACSEK, G.M. (1984). “Guidelines for dam design and operation to optimize fish production in impounded river basins”. CIFA Tech. Pap., 11:98p.

17. BRITSKI, H.A. SATO, Y. & ROSA, A.B.S. (1988). “Manual de identificação de peixes da região de Três Marias (Com chaves de identificação para os peixes da bacia do São Francisco)”. Brasília, Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicação - Codevasf, Divisão de Piscicultura e Pesca, 143p.
18. CADA, G. F. (1990). “A review of studies relating to the effects of propeller-type turbine passage on fish early life stages.” *North American Journal of Fisheries Management* 10(4):418-426.
19. CADA, G. F. (1999). “Effects on fish of changes in water pressure and dissolved gas saturation associated with hydroelectric turbine passage - considerations for biological tests”. Report to the U.S. Department of Energy Hydropower Program, Idaho Falls, ID. 14p.
20. CADA, G. F. (2001). “The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival”. *Fisheries*, v. 26, n. 9, September, p. 14-23.
21. CADA, G. F., CARLSON, T., FERGUSON, J., RICHMOND, M., & SALE M. (1999). “Exploring the role of shear stress and severe turbulence in downstream fish passage”. In *Proceedings of Waterpower '99. Hydropower's Future: Technology, Markets, and Policy*. P.A. Brookshier (ed.). American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia. 10p.
22. CADA, G. F., COUTANT, C. C., & WHITNEY, R. R. (1997). “Development of biological criteria for the design of advanced hydro power turbines”. DOE/ID-10578. Prepared for Office of Geothermal Technologies, U.S. DOE, Idaho Falls, ID.
23. CADA G. F. e ODEH, M. (2001). “Turbulence At Hydroelectric Power Plants And Its Potential Effects On Fish”. Report to Bonneville Power Administration, Contract No. 2000AI26531, Project No. 200005700, 37 electronic pages (BPA Report DOE/BP-26531-1)
24. CADA, G. F., RYON, M. G., WOLF, D. A., & SMITH, B. T. (2003). “Development of a new technique to assess susceptibility to predation resulting from sublethal

- stresses (indirect mortality)”. ORNL/TM-2003/195, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 40p. + appendices.
25. CADA, G. F., SALE, M. J., CARLSON, T., SOTIROPOULOS, F. & SMITH, B. (2004). “Characterizing turbulence and its biological effects at hydroelectric power plants”. 5th International Symposium on Ecohydraulics, Madrid, Spain, September 12-17.
26. CANADIAN ELECTRICITY ASSOCIATION (2001). “Considering Fish and Fish Habitat in Existing Hydroelectric Operations and Maintenance: Electricity Industry Practices”. Disponível em www.canelect.ca/english/Pdfs/RevCEA.pdf. Acessado em: 05/10/08.
27. CARLSON, T. (2001). “Proceedings of the turbine passage survival workshop”. June 14-15. PNNL-SA-33996. U.S. Army Corps of Engineers Portland District, Portland, Oregon.
28. CARLSON, T. J. & ABERNETHY, C. S. (2005). “Pilot Study of the Effects of Simulated Turbine Passage Pressure on Juvenile Chinook Salmon Acclimated with Access to Air at Absolute Pressures Greater than Atmospheric”. PNNL-15011, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
29. CARLSON, T. J. & DUNCAN, J. P. (2003). “Evolution of the sensor fish device for measuring physical conditions in severe hydraulic environments”. DOE/ID-11079. Prepared for the U.S. Department of Energy. By Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington.
30. CAROLSFELD, J., HARVEY, B., ROSS, C. & BAER, A. (2004). “A migratory fishes of South America: biology, fisheries, and conservation status”. Victoria: World Fisheries Trust/IDRC/World Bank, 372p.
31. CARVALHO, A. R. (2002). “Conhecimento ecológico no “varjão” do Alto Rio Paraná: alterações antropogênicas expressas na linguagem dos pescadores”. Acta Scientiarum (UEM), v. 24, n. 2, p. 581-589.

32. CEMIG-CETEC (2000). “Guia ilustrado de peixes da bacia do rio Grande”. 1 ed., Belo Horizonte, 141p.
33. CLAY, C. H. (1994). “Design of fishways and other fish facilities”. Boca Raton, Lewis, (2 nd ed.), 248p.
34. COLT, J., FIDLER, L. E. & ELSTON, R. (1994). “Review of monitoring plans for gas bubble disease signs and gas supersaturation levels on the Columbia and Snake Rivers”. Project Report No. 93-008, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon. 198p.
35. COTEL, A. J., WEBB, P. W. & TRITICO, H. M. (2006). “Do Brown Trout Choose Locations With Reduced Turbulence?”. *Transactions of the American Fisheries Society*, 135: 610-619.
36. COUTANT, C. C. (1998). “Turbulent attraction flows for juvenile salmonid passage at dams”. ORNL/TM-13608. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 28 p.
37. COUTANT, C. C. & WHITNEY, R. R. (2000). “Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: a review”. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 129:351-380.
38. DAVIDSON, R. (2000). “Modeling fish passage through turbines”. Proceedings of the Turbine Passage Survival Workshop. June 14-15, U.S. Army Corps of Engineers, Portland, OR.
39. DENG, Z., RICHMOND, M. C., MUELLER, R. P., DUNCAN, J. P. & CARLSON, T. J. (2005). “Laboratory study of biological response of juvenile salmon subjected to turbulent shear flows”. In Proceedings of Waterpower XIV, Advancing Technology for Sustainable Energy, Austin, Texas, July 18-22, 2005, p. 15 pp. HCI Publications, Kansas City, MO.
40. DEVORE, J. L. (2006). “Probabilidade e estatística para engenharia e ciências”. [Tradução Joaquim Pinheiro Nunes da Silva], São Paulo, Pioneira Thomson Learning, pg 332 – 663.

41. DOMENICI, P. & BLAKE, R. W. (1997). "The kinematics and performance of fish fast-start swimming". *Journal of Experimental Biology*, 200:1165–1178.
42. EATON, R. C., BOMBARDIERI, R. A. & MEYER, D. L. (1977). "The Mauthner-initiated startle response in teleost fish". *Journal of Experimental Biology*. 66: 65–81.
43. EBEL, W. J., RAYMOND, H. L., MONAN, G. E., FARR, W. E. & TANONAKA, G. K. (1975). "Effects of atmospheric gas supersaturation caused by dams on salmon and steelhead trout of the Snake and Columbia rivers". Processed Report. (Available from NWFSC, Fish Ecology Division, 2725 Montlake Blvd. E., Seattle, WA 98112.)
44. EIA- Energy Information Administration (2008). "International Energy Outlook 2008". Chapter 1 - World Energy Demand and Economic Outlook – Disponível em <www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html>. Acessado em: 02/02/09.
45. ELETROBRÁS (1995). "Seminário sobre fauna aquática e o setor elétrico brasileiro". Reuniões temáticas preparatórias: caderno 5 - ações, Piraí, 3 a 5 de maio, 1994 / Comitê Coordenador das Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico - COMASE. - Rio de Janeiro.
46. ENDERS, E. C., BOISCLAIR, D. & ROY, A. G. (2003). "The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*)". *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60:1149–1160.
47. EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil) (2008). "Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007". Rio de Janeiro: 244 p. : 180 il.
48. EPRI (1987). "Turbine-related fish mortality: review and evaluation of studies". Research Project 2694-4, Final Report: 102 p.
49. EPRI (1992). "Fish Entrainment and Turbine Mortality Review and Guidelines". Stone and Webster Eng. Corp., Boston, Massachusetts: 225 p
50. EVANS, D. H. (1993). "The Physiology of Fishes". CRC Press (CRC Marine Science Series), Boca Raton, Florida.

51. FEATHERS, M. G. & KNABLE, A. E. (1983). "Effects of depressurization upon largemouth bass". North American Journal of Fisheries Management. vol 3, pp. 86–90.
52. FERGUSON, J. W. (2005). "The Behavior and Ecology of Downstream Migrating Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) and Anadromous Brown Trout (*Salmo trutta* L.)". In Regulated Rivers in Northern Sweden. Rapport 44, Vattenbruksinstitutionen, Umeå.
53. FERGUSON, J. W., POE, T. P. & CARLSON, T. J. (1998). "Surface-oriented bypass systems for juvenile salmonids on the Columbia River", USA, In M. Jungwirth, S. Schmutz, and S. Weiss (eds.). Fish Migration and Fish Bypasses. Blackwell Science Ltd., Oxford, UK, pp. 281-299.
54. FERGUSON, J.W., POE, T. P. & CARLSON, T. J. (1998). "The design, development, and evaluation of surface oriented juvenile salmonid bypass systems on the Columbia River". USA, In: Fish migration and fish bypasses (eds M. Jungwirth, S. Schmutz and S. Weiss). Fishing News Books, Blackwell Science Ltd Publisher.
55. FERGUSON, J. W., MATTHEWS, G. M., MCCOMAS, R. L., ABSOLON, R. F., BREGE, D. A., GESSEL, M. H. & GILBREATH, L.G. (2005). "Passage of adult and juvenile salmonids through federal Columbia River Power System dams", Report NMFS-NWFSC-64, Northwest Fisheries Science Center, NOAA-Fisheries.
56. FERNANDEZ, R. D. (1995). "Os Impactos dos Represamentos Sobre a Ictiofauna. O Caso da ITAIPU". COMASE – 1995, In Seminário Sobre Fauna Aquática e o Setor Elétrico Brasileiro Reuniões Temáticas Preparatórias - Caderno 5 – Pág. 71 – Rio de Janeiro – Disponível em <www.eletrobras.gov.br/ELB/services/eletrobras/ContentManagementPlus> acessado em: 05/10/08.
57. FERREIRA, A. B. H. (1986). "Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa", Rio de Janeiro. Nova Fronteira, 2a.Ed, 1838p.

58. FIDLER, L. E. (1984). "A Study of Biophysical Phenomena Associated with Gas Bubble Trauma in Fish". Prepared for the Department of Fisheries and Oceans, Vancouver, British Columbia by Penny Applied Sciences Ltd., Penny, British Columbia.
59. FIDLER, L. E. (1988). "Gas Bubble Trauma in Fish". Ph.D. Thesis, Department of Zoology, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia.
60. FIDLER, L. E. (1992). "Design Considerations in the Development of Small Hydroelectric Facilities as Relates to Dissolved Gas Supersaturation and Gas Bubble Trauma in Fish". Contract report to Sigma Engineering Ltd., Vancouver, BC.
61. FIDLER, L. E. & MILLER, S. B. (1994). "British Columbia water quality guidelines for dissolved gas supersaturation". Draft report to B.C. Ministry of Environment, Canada Department of Fisheries and Oceans, 94 p., plus appendix. (Available from B.C. Ministry of Environment, Water Quality Branch, Water Management Division, 765 Broughton St., Victoria, B.C. V8V1X5).
62. FRANKE, G. F., WEBB, D. R., FISHER, R. K., MATHUR, D., HOPPING, P. N., MARCH, P. A., HEADRICK, M. R., LACZO, I. T., VENTIKOS, Y. & SOTIROPOULIOS, F. (1997). "Development of environmentally advanced hydropower turbine system design concepts", Voith Hydro, Inc. Report No.: 2677-0141. Prepared for the USDOE (Idaho) Contract No. DE-AC07-96ID13382.
63. FULLER, D., LEECH, J., MARTIN, A. (1998). "Adult Fish Passage at Ice Harbor Lock and Dam, Snake River Engineering Approaches to Ecosystem Restoration", Proceedings of Wetlands Engineering and River Restoration Conference, pp. 699-794, (doi 10.1061/40382(1998)119).
64. GARRISON, L. A., FISHER, R. K., Jr., SALE, M. J. & CADA, G. F. (2002). "Application of biological design criteria and computational fluid dynamics to investigate fish survival in Kaplan turbines". Proceedings of HydroVision 2002, HCI Publications, Inc., Kansas City, MO.

65. GIBB, A. C., SWANSON, B. O., WESP, H., LANDELS, C. & LIU, C. (2006). “Development of the escape response in teleost fishes: do ontogenetic changes enable improved performance?”. *Physiol. Biochem. Zool.* 79, 7. (doi:10.1086/498192).
66. GODINHO, A. L. (1993). “E os peixes de Minas em 2010?”. *Ciência Hoje*, 16(91): 44-49.
67. GODINHO, A. L., KYNARD, BOYD (2008). “Migratory fishes of Brazil: Life history and fish passage needs”. *Rivers Research and Applications*. 18: 171–183. DOI: 10.1002/rra.
68. GODINHO, H. P. & GODINHO, A. L. (1994). “Fish communities in southeastern Brazilian river basins submitted to hydroelectric impoundments”. *Acta Limnologica Brasiliensia* 5:187-197.
69. GODOY, M. P. (1985). “Aqüicultura. Atividade multidisciplinar. Escadas e outras facilidades para passagens de peixes. Estações de piscicultura”. Florianópolis, Brasil, Eletrosul, 77p.
70. GONÇALVES, D. B. (2005). “Desenvolvimento Sustentável: o desafio da presente geração”. *Revista espaço acadêmico* n°51, agosto 2005. Disponível em <<http://www.espacoacademico.com.br/>> acessado em 22/05/08.
71. GOODWIN, R. A., NESTLER, J. M., ANDERSON, J. J., WEBER, L. J. & LOUCKS D. P. (2006). “Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian–Lagrangian–agent method (ELAM)”. *Ecological Modelling*, 192: pp 197–223.
72. GORDON, N. D., MCMAHON, T. A. & FINLAYSON, B. L. (1992). “Stream hydrology: An introduction for ecologists”. John Wiley & Sons, New York, NY. 526p.
73. GORING, D. G., NIKORA, V. I. (2002). “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data”. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, n. 1, p. 117-126.

74. GOULDING, M. (1981). "Man and fisheries on an Amazon frontier". The Hague, Dr. W. Junk, 222p.
75. GOWANS, A., ARMSTRONG, J. D. & PRIEDE, I. G. (1999). "Movements of adult Atlantic salmon in relation to a hydroelectric dam and fish ladder". *Journal of Fish Biology* 54, 713–26.
76. GRESSWELL, R. E. (1998). "Preface to the Western Division of the American Fisheries Society Symposium on Potamodromous Salmonids". Eugene, Oregon, North Am. Journ. Fish. Manag (*in press*), 1997 In NORTHCOTE, T. G., *Migratory Behaviors of Fish and its Significance to Movement Through Riverine - Chapter 1*, JUNGWIRTH, M., SCHMUTZ, S e WEISS, S. *Fish Passage Facilities*, Fishing News Books, Oxford, UK., p. 3-18.
77. GUENSCH, G. R., MUELLER, R. P., MCKINSTRY, C. A. & DAUBLE, D. D. (2002). "Evaluation of Fish-Injury Mechanisms During Exposure to a High-Velocity Jet". PNNL-14173, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
78. HALE M. E. (1996). "The Development of Fast-Start Performance in Fishes: Escape Kinematics of the Chinook Salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*)". In *Integrative e Comparative Biology*. *American Zoologist* 1996 36(6):695-709; doi:10.1093/icb/36.6.695.
79. HARO, A. (2006). "Fish protection and downstream migration facilities for eastern North American diadromous species". In *Free Passage for Aquatic Fauna in Rivers and other Water Bodies (Proceedings, International DWA Symposium on Water Resources Management)*, Wasser Berlin, 85–90.
80. HARRIS, J. H. & GEHRKE, P. C. (1997). "Fish and rivers in stress – The NSW rivers survey". NSW Fisheries Office of Conservation, Cronulla, and the Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology, Canberra. 298 pp.
81. HEISEY, P. G., MATHUR, D., FULMER, J. & ADAMS, S. (2000). "Analysis and interpretation of injuries to turbine passed fish". *Proceedings of the Turbine Passage Survival Workshop*. June 14- 15, 2000. U.S. Army Corps of Engineers, Portland, OR.

- 82.HECKER,G. E. & COOK, T. C. (2005). “Development and evaluation of a new helical fish friendly hydro-turbine”. Published in ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Volume 131, Number 10, October.
- 83.HORVÁTH, E., MUNICIO, M. A. T. (1998). “Impacts of Dams on Fish Fauna – Feasibility of Mitigation Measures”, 2nd International PhD Symposium in Civil Engineering, Budapeste.
- 84.HUDSPETH, A. J. (1989). “How the ear’s works”. Nature, Londres, 341:397-404.
- 85.IEA - International Energy Agency (1995). “Key World Energy Statistics”. Disponível em: <http://www.iea.org/stats/files/keystats/jsfrmset.htm>. Acessado em em novembro/2009.
- 86.IEA - International Energy Agency (2000). “Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programs. Annex III: Hydropower and the Environment: Present Context and Guidelines for Future Action”. Volume II: May 2000. Pg. 15-20.
- 87.ISAB (1998). “Review of the U.S. Army Corps of Engineers Capital Construction Program. Part II. A. Development and Testing of Surface Bypass”. Report No. ISAB 98-7. Northwest Power Planning Council, Portland, Oregon, and National Marine Fisheries Service, Seattle, Washington.
- 88.JACKSON, C. D & MARMULLA, G. (2001). “The Influence of Dams on River Fisheries In MARMULLA.G., Dams, Fish and Fisheries – Opportunities, Challenges and Conflict Resolution”, FAO, paper 419, Roma.
- 89.JENSEN, J. O. T. (1980). “Effect of total gas pressure, temperature and total water hardness on steelhead eggs and alevins. A progress report”. In: Proceedings of the 31st Northwest Fish Culture Conference, Curtenay, British Columbia, Canada. Pp. 15-22.

90. JENSEN, J. O. T. (1988). "Combined effects of gas supersaturation and dissolved oxygen levels on steelhead (*Salmo gairdneri*) eggs, larvae, and fry". *Aquaculture*. 68(2): 131-139.
91. JONES, F. R. H. (1951). "The swimbladder and the vertical movements of teleostean fish". In. *Physical factors*. *Journal of Experimental Biology*. 28:553-566.
92. JOHNSON, E. L., CLABOUGH, T. S., PEERY, C. A., BENNETT, D. H., BJORN, T. C., CAUDILL, C. C. & RICHMOND, M. C. (2007). "Estimating adult Chinook salmon exposure to dissolved gas supersaturation downstream of hydroelectric dams using telemetry and hydrodynamic models". *River Research and Applications* 23:963-978.
93. JOHNSON, P. L. (1988). "Hydro-power intake design considerations". *American Society of Civil Engineers, Jour. Hydraulic Eng.* 114(6): 651-661.
94. JOHNSON, T. P. & BENNETT A. F. (1995). "The thermal acclimation of burst escape performance in fish: An integrated study of molecular and cellular physiology and organismal performance". *Journal of Experimental Biology*. 198: 2165-2175.
95. KNABLE, A. E., FEATHERS, M. G. (1983). "Device for Examining the Effects of Pressure Changes on Fish". *The Progressive Fish-Culturist*: Vol. 45, No. 1 pp. 16-18.
96. KNUDSEN, F. R., SAND O. & ENGER, P. S. (1992). "Awareness reactions and avoidance responses to sound in juvenile Atlantic salmon". *Salmo salar L. Journal of Fisheries Biology*. 40:523-534.
97. KOTTELAT, M. & FREUHOF, J. (2007). "Handbook of European Freshwater Fishes". Cornol, Switzerland: Publications Kottelat. 646 p.
98. KRAUS, N. C., KOHRMANN, A., & CABERERA, R. (1994). "New acoustic meter for measuring 3D laboratory flow". *Journal of Hydraulic Engineering* 120:406-412.

99. LARINIER, M. (2001a). "Environmental Issues, Dams and Fish Migration In MARMULLA.G., Dams, Fish and Fisheries – Opportunities, Challenges and Conflict Resolution", FAO, paper 419, Roma, 2001;
100. LARINIER, M. (2001b). "Dams, fish, and fisheries: opportunities, challenges, and conflict resolution". FAO Fisheries Technical Paper No. 419. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
101. LARINIER M. & TRAVADE F. (1999). "The development and evaluation of downstream bypasses for juveniles salmonids at small hydroelectric plants in France". In ODEH, M. (ed), Innovations in Fish Passage Technology, Bethesda, Maryland, USA: American Fisheries Society, 25-42p.
102. LARINIER, M., TRAVADE, F. & PORCHER, J. P. (2002). "Fishways: biological basis, design criteria and monitoring". Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 364: 208.
103. LARINIER, M. & VIGNEUX, E. (2002). "Fishways: biological basis, design criteria and monitoring", Bull. FR. Pêche Piscic. n°364.
104. LARINIER, M. (2008). "Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France". Hydrobiologia. 609:97–108.
105. LELEK, A. (1987). "Factors Influencing Changes in Fish Assemblages of Pacific Northwest Streams". Community and Evolutionary Ecology of North American Stream Fishes, University of Oklahoma Press. Norman, p. 193-202.
106. LIAO, J. C., BEAL, D. N., LAUDER, G. V. & TRIANYAFYLLOU, M. S. (2003). "The Karma'n gait: novel body kinematics of rainbow trout swimming in a vortex street". Journal of Experimental Biology 206:1059–1073.
107. LOHRMANN, A., CABRERA, R. & KRAUS, N. C. (1994). "Acoustic-Doppler velocimeter (ADV) for laboratory use". Proc. Conf. on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation, Buffalo, NY, American Society of Civil Engineers, 351–365.

108. LUCAS, M. C. & BARAS, E. (2000). "Migration of Freshwater Fishes". Oxford: Blackwell Science Ltd.
109. LUNDBERG, J. G. & LITTMANN, M. W. (2003). "Pimelodidae". In: Check list of the freshwater fishes of South America, R. E. Reis, S. O. Kullander and C. J. Ferraris (eds.). EDIPUCRS, Porto Alegre, pp. 432 - 446.
110. LUPANDIN, A. I. & PAVLOV, D. S. (1996). "The effects of starvation on the reaction of fish to flows with different intensity of turbulence". *Journal of Ichthyology* 36: 416–419.
111. McALLISTER, D. E., HAMILTON, A. & HARVEY, B. (1997). "Global Freshwater Biodiversity: Striving for the integrity of freshwater ecosystems". *Sea Wind – Bulletin of Ocean Voice International* 11(3):140 pg, SIFR/IDRC.
112. MARCH, P. A. & FISHER, R. K. (1999). "It's not easy being green: Environmental technologies enhance conventional hydropower's role in sustainable development". *Annual Review of Energy and the Environment*, 24, (November 1999).
101. MATHERS, R. G., DE CARLOS, M. , CROWLEY, K. & TEANGANA, D. O. (2002). "A review of the potential effect of Irish hydroelectric installations on Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations, with particular reference to the River Erne". *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy* 102B:269–79.
102. MARTINS, S. L. (2000). "Sistemas para Transposição de Peixes". Dissertação de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo, 170p.
103. MATTICE, J. S. (1991). "Ecological effects of hydropower facilities". Chapter 8, In J.S. Gulliver and R.E.A. Arndt (Eds.). *Hydropower Engineering Handbook*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY.
104. McDOWALL, R. M. (1998). "Understanding diadromy". NIWA Water & Atmosphere, 3,19, 1995. In NORTHCOTE, T. G., *Migratory Behaviors of Fish and its Significance to Movement Through Reverie - Chapter 1*, In JUNGWIRTH, M.,

- SCHMUTZ, S e WEISS, S. *Fish Passage Facilities*, Fishing News Books, Oxford, UK., p. 3-18.
105. McKEOWN, BRIAN A. (1984). “Fish Migration”, Department of Biological Sciences, Simon Fraser University , Canadá : Timber Press, 224-p.
106. MAGALHÃES, V. P. F., POMPEU, P. S. & MARTINEZ, C. B. (2004). “A possibilidade de recuperação energética da água de atração do elevador de peixes da UHE Santa Clara”. *In: XXI Congresso Latinoamericano de Hidraulica, 2004, São Pedro - SP. XXI Congresso Latinoamericano de Hidraulica – cd-rom.*
107. MESA, M. & WARREN, J. (1997). “Predator avoidance ability of juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) subjected to sublethal exposures of gas supersaturated water”. *Canadian Journal Fisheries and Aquatic Sciences* 54:757- 764.
108. MINAS GERAIS (1997a). “Lei 12.488, de 9 de abril de 1997 do Estado de Minas Gerais, Torna obrigatória a construção de escadas para peixes de piracema em barragem edificada pelo estado”.
109. MINAS GERAIS (1997b). “Artigo 20º do Decreto Lei nº 38.744, de 9 de abril de 1997 do Estado de Minas Gerais, Exige a construção de mecanismos de transposição para peixes para o licenciamento ambiental de novas usinas hidrelétricas”.
110. MINAS ON-LINE (2008). “Cemig resgata oito toneladas de peixes em rios do Estado”. Disponível em: http://www.correiodeuberlandia.com.br/texto/2007/04/24/26950/cemig_resgata_oito_toneladas_de_pei.html. Acessado em novembro/2009.
111. MOFFITT, C. M., KYNARD, B. & RIDEOUT, S. G. (1982). “Fish passage facilities and anadromous fish restoration in the Connecticut river basin”. *Fisheries*, 7(6): 2-11.
112. MONTEN, E. (1985). “Fish and Turbines. Fish Injuries during Passage through Power Station Turbines”. Vattenfall, Stockholm: 111 p. apud LARINIER, M., 2008. Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia*. 609:97–108.

113. MORING, J. R. (1993). "Anadromous stocks". In: Kohler, C.C. & Hubert, W. A. (eds). *Inland fisheries management in North America*. Bethesda: Maryland, American Fisheries Society, p. 553-580.
114. MOYLE, P. B. & CECH, J. J. (2000). "Fishes: An introduction to Ichthyology". 4th ed. Prentice – Hall, Inc New Jersey.
115. MONTGOMERY, J.C., BAKER, C.F. & CARTON, A.G. (1997). "The lateral line can mediate rheotaxis in fish". *Nature* 389: 960-963 .
116. MONTGOMERY, J. C., CARTON, A. G., VOIGT, R., BAKER, C. F. & DIEBEL, C. (2000). "Sensory processing of water currents by fishes". *Philosophical Transactions of The Royal Society of London series B*, 355(1401): 1325-1327.
117. MONTGOMERY Watson Inc. (agora MWH Global Inc.) (1995). "Allowable Gas Supersaturation for Fish Passing Hydroelectric Dams", Project No. 93-8, Final Report prepared for Bonneville Power Administration, U.S. Department of Energy, Portland, Oregon.
118. NEITZEL, D. S., DAUBLE, D., RICHMOND, M. & CADA, G. F. (2000). "Developing biological specifications for fish friendly turbines". *Proceedings of HydroVision 2000*, Charlotte, NC. August 8-11.
119. NEITZEL D. A, DAUBLE, D. D., CADA, G. F., RICHMOND, M. C., GUENSCH, G. R., MUELLER, R. P., ABERNETHY, C. S. & AMIDAN, B. G. (2004). "Survival Estimates for Juvenile Fish Subjected to a Laboratory-Generated Shear Environment". *Transactions of the American Fisheries Society* 133:447-454.
120. NESTLER, J. M., GOODWIN, R. A., COLE, T., DEGAN, D. & DENNERLINE, D. (2002). "Simulating movement patterns of blueback herring in a stratified southern impoundment". *Transactions of the American Fisheries Society* 131, 55-69.
121. NIKORA, V. I. & GORING, D. G. (1998). "ADV turbulence measurements: can we improve their interpretation?". *Journal of Hydraulic Engineering* 124:630–634.

122. NIKORA, V. I. & GORING, D. G. (2000). "Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds". *Journal of Hydraulic Engineering* 126:679–690.
123. NIKORA, V. I., GORING, D. G. & BIGGS, B. J. F. (2002). "Some observations of the effects of micro-organisms growing on the bed of an open channel on the turbulence properties". *Journal of Fluid Mechanics* 450:317–341.
124. NIKORA, V. I., ABERLE, J., BIGGS, B. J. F., JOWETT, I. G. & SYKES J. R. E. (2003). "Effects of fish size, time-to-fatigue and turbulence on swimming performance: a case study of *Galaxias maculatus*". *Journal of Fish Biology*, Vol. 63, pp. 1365–1382
125. ODEH, M. (1999). "Innovations in Fish Passage Technology", American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
126. ODEH, M., NOREIKA, J. F., HARO, A., MAYNARD, A., CASTRO-SANTOS, T. & CADA, G. F. (2002). "Evaluation Of The Effects Of Turbulence On The Behavior Of Migratory Fish". Final Report 2002, Report to Bonneville Power Administration, Contract No. 00000022, Project No. 200005700, 55 electronic pages (BPA Report DOE/BP-00000022-1).
127. ODEH, M. & ORVIS C. (1998). "Downstream fish passage design considerations and developments at hydroelectric projects in the Northeast USA". In M. Jungwirth, S. Schmutz, and S. Weiss (eds.). *Fish Migration and Fish Bypasses*. Blackwell Science Ltd., Oxford, UK, pp. 267-280.
128. PAVLOV, D. S., SKOROBOGATOV, M. A. & SHTAF, L. G. (1982). "Influence of degree of stream turbulence on the magnitude of the critical current velocity for fish". *Doklady Biological Sciences* 267:560-562.
129. PAVLOV, D. S. (1989). "Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR". *FAO Fisheries Technical Paper*, 308:97p.

- 130.PAVLOV, D. S. (1994). "The downstream migration of young fishes in rivers: mechanisms and distribution". *Folia Zoologica*, 43: 193-208.
- 131.PAVLOV, D. S., LUPANDIN, A. I. & SKOROBOGATOV, M. A. (2000). "The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish". *Journal of Ichthyology* 40(Supplement 2):S232–S261.
- 132.PAVLOV, D. S., MIKHEE, V. N., LUPANDIN, A. I. & SKOROBOGATOV, M. A. (2008). "Ecological and behavioral influences on juvenile fish migrations in regulated rivers: a review of experimental and field studies". *Journal of Hydrobiologia*, Springer Netherlands, 0018-8158 (Print) 1573-5117 (Online). Volume 609, Number 1, pp 125-138.
- 133.PETTS, G. E. (1984). "Impounded rivers. Perspectives for ecological management". Chichester: U.K. Wiley.
- 134.POMPEU, P. S., HORTA, L. F. M., MARTINEZ, C. B. (2009). "Evaluation of the effects of pressure gradients on four brazilian freshwater fish species". *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 52, p. 111-118.
- 135.RICHMOND, M., PERKINS, W. A. & SCHEIBE, T. D. (1998). "Two-Dimensional Simulation of Hydrodynamics, Water Quality, and Fish Exposure in the Columbia/Snake River System", *In Proceedings of Waterpower '99. Hydropower's Future: Technology, Markets, and Policy*. P.A. Brookshier (ed.). American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia. 10 p.
- 136.RICHTER, B. D., BAUMGARTNER, J.V., WIGINGTON, R. & BRAUN D.P. (1997). "How much water does a river need?". *Freshwater Biology* 37:231-249.
- 136.RUGGLES, C. P. (1980). "A review of the downstream migration of Atlantic salmon". *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic. Sciences*, 952: 39 pp. Quebec Department of Fisheries and Oceans.
- 137.RYAN, B. A. & DAWLEY, E. M. (1998). "Effects of dissolved gas supersaturation on fish residing in the Snake and Columbia Rivers, 1997". *National Marine Fisheries*

- Service, Fish Ecology Division, Northwest Fisheries Science Center, Seattle, Washington, to Bonneville Power Administration (Project 96-022-00).
138. SABINO, J. & PRADO, P. I. (2003). “Avaliação do Estado do Conhecimento da Diversidade Biológica do Brasil, Vertebrados”. Versão Preliminar - COBIO/MMA – GTB/CNPq – NEPAM/UNICAMP.
139. SALE, M. J., CADA, G. F., CHANG, L. H., CHRISTENSEN, S. W., RAILSBACK, S. F., FRANCFORT, J. E., RINEHART, B. N. & SOMMERS, G. L. (1991). “Environmental Mitigation at Hydroelectric Projects”. Volume 1. Current Practices for Instream Now Needs, Dissolved Oxygen, and Fish Passage. DOE/ID- 10360, U.S. Department of Energy, Idaho Operations Office, Idaho Falls, ID.
140. SANTOS, E. (1987). “Peixes de água doce: vida e costumes dos peixes do Brasil”. 4.ed. Belo Horizonte: Itatiaia.
141. SCHILT C. (2007). “Developing fish passage and protection at hydropower dams”. *Applied Animal Behaviour Science*, Volume 104, Issue 3, Pages 295-325.
142. SCHNITTER, N. J. (1994). “A history of dams - the useful pyramids”, A. A. Balkema, Rotterdam.
143. SCHREIBER, G. P. (1978). “Usinas Hidrelétricas”. São Paulo – Sp: Editora Edgard Blucher Ltda., 250 p.
144. SHIRAHATA, S. (1966). “Experiments on nitrogen gas disease with rainbow trout fry”. *Bulletin of the Freshwater Fisheries Research Laboratory (Tokyo)*. 15:197-211.
145. SHRIMPTON, J. M., RANDALL, D. J. & FIDLER, L. E.. (1990a). “Factors affecting swim bladder volume in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) held in gas supersaturated water”. *Canadian Journal of Zoology* 68:962-968.
146. SHRIMPTON, J. M., RANDALL, D. J. & FIDLER, L. E. (1990b). “Assessing the effects of positive buoyancy on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) held in gas supersaturated water”. *Canadian Journal of Zoology* 68:969-973.

147. SHTAF, L. G., PAVLOV, D. S., SKOROBOGATOV, M. A. & BAREKYAN, A. S. (1983). "The influence of flow turbulence on fish behavior". *Journal of Ichthyology* 23(2):129-140.
148. SKOROBOGATOV, M. A. & PAVLOV, S. D. (1991). "A study of the orientation of young roach, *Rutilus rutilus*, with respect to current velocity". *Journal of Ichthyology* 31:142-148.
149. SKOROBOGATOV, M. A., PAVLOV, D. S. & LUPANDIN, A. I. (1996). "Effects of current velocity and turbulence intensity on the distribution of the roach *Rutilus rutilus* in a water stream". *Journal of Ichthyology* 36(8):654-658.
150. SONTEK (2001). "SonTek/YSI ADVField/Hydra Acoustic Doppler Velocimeter (Field) Technical Documentation", SonTek/YSI, San Diego, USA.
151. SWALES, S. (1994). "Habitat restoration methods – a synthesis". In: Cowx, I.G. *Rehabilitation of freshwater fisheries*. Oxford, Fishing News Books, 133-137p.
152. TACKLEMAKING (2009). "Understanding the "C-Start" Response Trigger". Disponível em <http://www.tacklemaking.com/default.php?pageID=119> . Acessado em dezembro 2009.
153. THERRIEN J. & BOURGEOIS, G. (2000). "Fish Passage at Small Hydro Sites", IEA Tech. Report. CANMET, Energy Technology Centre, Ottawa, March, pp 134.
154. TRITTON, D. J. (1998). "Physical fluid dynamics". Oxford Science Pub.
155. TSVETKOV, V. I., PAVLOV, D. S. & NEZDOLLY, V. K. (1972). "Changes of hydrostatic pressure lethal to the young of some freshwater fish". *Journal of Ichthyology* 12, 871–874.
156. TURNPENNY, A. W. H. (1998). "Mechanisms of fish damage in low-head turbines: an experimental appraisal". In: *Fish Migration and Fish Bypasses* (Ed. Jungwirth, M, Schmutz, S and Weiss, S). Fishing News Books, Oxford, Blackwell: 300-314

157. USACE (US Army Corps of Engineers). (1991). "Revised Compendium on the Success of Passage of Small Fish Through Turbines". North Pacific Division, Portland, Oregon.
158. USACE (US Army Corps of Engineers). (1995). "Dissolved Gas Monitoring for the Columbia and Snake Rivers". North Pacific Division, Portland Oregon (annually since 1992).
159. USACE (US Army Corps of Engineers). (1996). "Dissolved Gas Abatement. Phase I". Technical Report. Walla Walla District, Walla Walla, Washington and Portland District, Portland, Oregon.
160. USACE (US Army Corps of Engineers). (1998). "Dissolved Gas Abatement Study. Phase II". Work Plan. Walla Walla District, Walla Walla, Washington and Portland District, Portland, Oregon.
161. USACE (US Army Corps of Engineers) (1998). "ISAB 98-8. Report of the Independent Scientific Advisory Board - Review of the U.S. Army Corps of Engineers' Capital Construction Program, Parte II. B. *Dissolved Gas Abatement Program*". Independent Scientific Advisory Board for the Northwest Power Planning Council and the National Marine Fisheries Service.
162. VOGEL, S. (1981). "Life in moving fluids: The physical biology of flow". Princeton University Press. Princeton, New Jersey. 352 p.
163. VAZZOLER, A. E. A. M, AGOSTINHO, A. A. & HAHN, N. S. (1997). "A Planície de Inundação do Alto Rio Paraná – Aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos". 1ª edição – Editora da Universidade Estadual de Maringá.
164. WAHL, T. L. (2000). "Analyzing ADV Data Using WinADV". Proceedings of the Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management 2000, Minneapolis, Minnesota.

165. WAHL, T. L. (2003). Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data” by Goring, D. G. e Nikora, V. I. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 9, p. 987-988.
166. WEBB, J. (1989). “The movements of adult Atlantic salmon in the River Tay”. *Scottish Fisheries Research Report*, 44, 32pp.
167. WEILAND M. A, CARLSON, T. J. (2003). “Technologies for evaluating fish passage through turbines”. PNNL-14437, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (<http://www.hydropower.id.doe.gov/>)
168. WEITKAMP, D. E. & KATZ, M. (1980). “A review of dissolved gas supersaturation literature”. *Transactions of the American Fisheries Society* 109:659-702.
169. WHITE, R. G., PHILLIPS, G., LIKNES, G., BRAMMER, J., CONNER, W., FIDLER, L., WILLIAMS, T. & DWYER, W. (1991). “Effects of Supersaturation of Dissolved Gases on the Fishery of the Bighorn River Downstream of the Yellowtail Afterbay Dam”. Montana Cooperative Fishery Research Unit, Montana State University, Bozeman, Montana. Final report to the US Bureau of Reclamation.
170. WIESNER, C., JUNGWIRTH, M., SCHMUTZ, S., UNFER, G. & ZITEK, A. (2006). “Importance of connectivity in the Danube River catchment”. In *Free Passage for Aquatic Fauna in Rivers and other Water Bodies (Proceedings, International DWA Symposium on Water Resources Management)*, Wasser Berlin: 142–150.
171. YOUNG, L. M. (2003). Comments on “Evaluation of Mitigation Effectiveness at Hydropower Projects: Fish Passage Draft Report.” Letter from L. M. Young, Pennsylvania Boat and Fish Commission, to J. K. Novak, Federal Energy Regulatory Commission, Washington, DC, October 29.
172. ZOTTOLI, S. J., DAVIS, G. W. & NORTHEN, S. C. (1992). “Comparative studies of the Mauthner cell in teleosts”. In *Neurology Today* (ed. I. Benedetti, B. Bartolini and E. Capanna), pp. 53–64. Modena, Italy: Mucchi Editore.

ANEXO I**FORMULÁRIO DE TESTES DE PRESSÃO E
CHECK LIST DE OBSERVAÇÃO**

Teste de Descompressão Rápida

Experimento: _____ Data: ___/___/___ Hora: _____ Compressão: _____
 Nº de Peixes: _____ Descompressão: _____
 Data e hora última alimentação: _____ Tanque de observação: _____
 Temp média: _____

Observações Iniciais

	Peixes	Comp. Padrão	Comp. Total	Largura	Altura	Peso (g)	Caract iniciais
controle	C1						
	C2						
	C3						
	C4						
	C5						
teste	T1						
	T2						
	T3						
	T4						
	T5						

Observações durante o teste

	Peixes	Observações	Compressão			Descompressão
			10mca	30mca	50mca	
controle	C1					
	C2					
	C3					
	C4					
	C5					
teste	T1					
	T2					
	T3					
	T4					
	T5					

Avaliação pós-teste

	Peixes	Após 0hs	Após 1h	Após 24hs	Após 48hs	Observações
controle	C1					
	C2					
	C3					
	C4					

teste	C5					
	T1					
	T2					
	T3					
	T4					
	T5					

TABELA PARA OBSERVAÇÕES

TESTES DE PRESSÃO

TIPO DE DANOS		LOCAL		POSIÇÃO	
M	morte	B	boca	E	esquerda
EX	exoftalmia	O	olho	D	Direita
H	hemorragia	BR	branquias	S	superior
B	bolha de ar	BB	barbilhão	I	inferior
D	dano	F	ferrão	P	posterior
AE	agitação excessiva	CB	cabeça		
F	fungo	BA	barriga		
AC	alteração de cor	N	nadadeira		
NA	nada aparente	C	cauda		
		D	dorso		

ANEXO II

FORMULÁRIO PARA OS TESTES DE REAÇÃO - FORMAÇÃO DO “C”

Formulário de Teste de Estímulo em Peixe - Formação do C																					
Data:		/ / 2008																			
Tipo de Peixe:		<input type="checkbox"/>	Mandi	<input type="checkbox"/>	Lambari																
Status do Peixe:		<input type="checkbox"/>	Alimentado	<input type="checkbox"/>	Não Alimentado																
Comprimentos:		Ls - _____ cm	Lt - _____ cm	Lf - _____ cm	Es - _____ cm																
Pré-Teste																					
Hora de Início:		Tempo de Aclimação (min.):			Temperatura:																
Primeiro estímulo:		_____ min.	<input type="checkbox"/>	Reagiu	<input type="checkbox"/>	Não Reagiu															
Arquivo vídeo:																					
Segundo estímulo:		5 min.	<input type="checkbox"/>	Reagiu	<input type="checkbox"/>	Não Reagiu															
Arquivo vídeo:																					
Teste																					
Hora de Início:		Hora de Término:			Temperatura:																
Observações:																					
1-10 min.:		<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr> </table>			1	2	3	4	5	6	7	8	9	<table border="1"> <tr><td>3a. Camada</td></tr> <tr><td>2a. Camada</td></tr> <tr><td>1a. Camada</td></tr> </table>					3a. Camada	2a. Camada	1a. Camada
1	2	3																			
4	5	6																			
7	8	9																			
3a. Camada																					
2a. Camada																					
1a. Camada																					
11-20min.:		<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr> </table>			1	2	3	4	5	6	7	8	9	<table border="1"> <tr><td>3a. Camada</td></tr> <tr><td>2a. Camada</td></tr> <tr><td>1a. Camada</td></tr> </table>					3a. Camada	2a. Camada	1a. Camada
1	2	3																			
4	5	6																			
7	8	9																			
3a. Camada																					
2a. Camada																					
1a. Camada																					
21-30min.:		<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr> </table>			1	2	3	4	5	6	7	8	9	<table border="1"> <tr><td>3a. Camada</td></tr> <tr><td>2a. Camada</td></tr> <tr><td>1a. Camada</td></tr> </table>					3a. Camada	2a. Camada	1a. Camada
1	2	3																			
4	5	6																			
7	8	9																			
3a. Camada																					
2a. Camada																					
1a. Camada																					
Pós-Teste																					
Hora de Início:		Temperatura (C):																			
Primeiro estímulo (min.):		_____ min.	<input type="checkbox"/>	Reagiu	<input type="checkbox"/>	Não Reagiu															
Arquivo vídeo:																					
Segundo estímulo:		5 min.	<input type="checkbox"/>	Reagiu	<input type="checkbox"/>	Não Reagiu															
Arquivo vídeo:																					
Terceiro estímulo:		15 min.	<input type="checkbox"/>	Reagiu	<input type="checkbox"/>	Não Reagiu															
Arquivo vídeo:																					

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)