

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

**LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL E  
COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DE  
UMA ESCADA DE PEIXES DO TIPO RANHURA  
VERTICAL EM DIFERENTES VAZÕES E  
DECLIVIDADES**

**Fernando Luís Fonseca de Oliveira Tomé**

**Belo Horizonte**

**2016**

**LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL E  
COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DE UMA  
ESCADA DE PEIXES DO TIPO RANHURA VERTICAL  
EM DIFERENTES VAZÕES E DECLIVIDADES**

**Fenando Luís Fonseca de Oliveira Tomé**

**Fernando Luís Fonseca de Oliveira Tomé**

**LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL E  
COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DE UMA  
ESCADA DE PEIXES DO TIPO RANHURA VERTICAL  
EM DIFERENTES VAZÕES E DECLIVIDADES**

Projeto de Pesquisa apresentado ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientadora: Edna Maria de Faria Viana

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG

2016

T656I

Tomé, Fernando Luís Fonseca de Oliveira.

Levantamento experimental e computacional do comportamento de uma escada de peixes do tipo ranhura vertical em diferentes vazões e declividades / Fernando Luís Fonseca de Oliveira Tomé. – 2016.

ix, 70 f., enc.: il.

Orientadora: Edna Maria de Faria Viana.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 66-70.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Peixe - Migração - Teses. 4. Peixe - Locomoção - Teses. 5. Hidráulica - Teses. I. Viana, Edna Maria de Faria. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Levantamento experimental e computacional do comportamento de uma escada de peixes do tipo ranhura vertical em diferentes vazões e declividades

**FERNANDO LUÍS FONSECA DE OLIVEIRA TOMÉ**

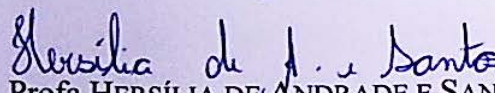
Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

  
Profª EDNA MARIA DE FARIA VIANA - Orientadora

  
Prof. CARLOS BARREIRA MARTINEZ

  
Prof. JORGE LUIS ZEGARRA TARQUI

  
Engº ALOYSIO PORTUGAL MAIA SALIBA

  
Profª HERSÍLIA DE ANDRADE E SANTOS

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento  
Coordenador

Profª. Edna Maria de Faria Viana  
Orientadora

Belo Horizonte, 29 de junho de 2016.

## **AGRADECIMENTOS**

Deus, em sua força extraordinária, fazendo morada em todo o universo e dentro de nós, agradeço profundamente por todos os acertos e revesses existentes para a chegada deste momento.

Maurílio de Oliveira Tomé e Mírian Fátima P. Fonseca de Oliveira Tomé, pais queridos e amados, fontes de inspiração e responsáveis pela cultivação de virtudes em meu íntimo, agradeço enormemente por todos os esforços, muitos deles sacrificiais, desprendidos em cada segundo de suas vidas para permitir que meus sonhos se realizem.

Mentora inspiradora, a Doutora Edna Maria de Faria Viana, esteve sempre presente desde os momentos mais desafiadores, até os momentos mais tranquilos. Auxiliando, motivando e dando suporte de uma maneira surpreendentemente inesperada. Grato por essa amizade de oito anos.

A todos meus familiares, em especial aos meus irmãos Carolina, Alvinho e Silvaninha, companheiros e amigos de coração e almas, e aos meus sobrinhos Julinha e Gugu, por servirem de exemplos de alegria e energia em minha vida.

Tantos amigos que colorem e temperam a vida com sabores e formas tão distintas e especiais que foram fontes de sustento de força de vontade, persistência e dedicação.

Ao Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e seus funcionários permitindo a realização dos experimentos laboratoriais.

Aos estudantes Hadassa Regis Guia e Guilherme Galhardo pelo suporte prestado.

À Golder Associates por permitir o uso da licença do Software Flow3D.

E ao Gustavo Pires, por sua alegria e energia.

*“Há escolas que são gaiolas e há escolas que são asas.”*

Rubem Alves

## RESUMO

A continuidade ecológica, em particular a conectividade longitudinal de cursos d'água se torna o principal fator de restauração em cursos d'água regularizados por barragens. O objetivo da construção de um Mecanismo de Transposição de Peixes (MTP) é restaurar ao máximo essa conectividade, possibilitando a ocorrência do fluxo ascendente dos peixes migratórios na região da barragem.

O sucesso de um projeto de MTP depende tanto do estudo da capacidade natatória de peixes quanto da análise dos parâmetros hidráulicos e estruturais mais adequados do mecanismo para a passagem aos peixes migrantes durante a piracema.

O estudo da eficiência de subida do peixe pelo MTP depende do monitoramento de parâmetros como a velocidade, a dissipação de energia e a tensão cisalhante de Reynolds ao longo do trajeto. A avaliação dos campos de velocidade é de fundamental importância para a passagem de peixes, que por natureza possuem capacidade natatória limitada. O tempo e a velocidade com que o peixe sofre fadiga são usados para cálculo de sua velocidade crítica natatória e diversos testes em laboratório são feitos para determiná-la, para as diferentes espécies. O valor da velocidade de escoamento na estrutura não deve ultrapassar o valor limite suportado pelo animal. Para esse estudo, o valor limite de velocidade adotado é de 1,3 m/s.

Além do limitador de velocidades, a transposição ainda deve ocorrer sem que valores muito grandes de dissipação de energia sejam atingidos. Para o MTP do tipo ranhura vertical em estudo, o valor limite de dissipação de energia no sistema é de 191 W/m<sup>3</sup>. E ainda sem ultrapassar os limites de tensão cisalhante de Reynolds de 500N/m<sup>2</sup>.

Esse trabalho apresenta um estudo do comportamento hidráulico de um MTP do tipo escada com ranhura vertical, com o objetivo de analisar os campos de velocidade, os níveis de dissipação de energia e a tensão cisalhante de Reynolds para os valores de vazão de 35; 40; 45; 50 e 55 m<sup>3</sup>/h (modelo reduzido) ou 1,50; 1,71; 1,93; 2,14 e 2,35 m<sup>3</sup>/s (protótipo) e declividades variáveis de 6; 8; 10 e 12%. Os valores da velocidade são obtidos experimentalmente em um modelo reduzido de MTP utilizando-se um sistema de medição de velocidades ADV (Anemômetro Doppler Velocímetro). Os valores medidos de velocidade são pós-processados permitindo a geração de mapas de velocidades em um tanque. Os mapas de velocidade permitem estimar os níveis de dissipação de energia e de tensão cisalhante de Reynolds. A análise comparativa dos parâmetros hidráulicos obtidos para os valores de vazão permite avaliar a influência da vazão e da declividade nas velocidades, dissipação de energia e tensão cisalhante de Reynolds dos tanques do MTP para a transposição eficiente de peixes.

Por fim um modelo de simulação matemática, através elementos finitos de volume, com o software Flow3D, desenvolvido pela Flow Science, foi utilizado para se chegar em um modelo matemático coerente, e de acordo com os experimentos físicos para futuros usos com variações no design da escada de peixes dentre outras variações possíveis.

Palavras –chave: Escada de peixes; parâmetros hidráulicos; modelo reduzido; Flow3D.

## ABSTRACT

Fishways provide a better environmental surrounds to streams and rivers that were intercepted with weirs or dams. It is achieved providing the migration of fish through these systems. Fish swim capabilities correlated to hydraulic and structural parameters are the key of design a good fishway.

Velocity, dissipation energy and Reynolds shear stress are hydraulic parameters necessities to assessment the fishways in terms of capability to be a good ambience to fishes swim. Making a good appraisal of the distribution of velocity through a tank is important, especially for fish with limited swim capability. Critical swimming speed is a standard measurement to assess swimming capabilities of different species of fishes based on its fatigue using time of exposure for different velocities. The value of flow velocity on a fishway should not be above the animal resistance. For this study, the threshold velocity considered is 1.3m/s or 4.3ft/s.

Further velocity threshold, the fish travel should be done with acceptable values of power dissipation. Vertical slots ladder fish were used and 191 W/m<sup>3</sup> or 5.41 W/ft<sup>3</sup> is the power dissipation threshold for this specific fishway. The third and last threshold used as reference was of 500N/m<sup>2</sup> or 46.5N/ft<sup>2</sup> for Reynolds shear stress.

Using an experimental scale model, fishway with vertical slots through a channel this study aim analyse velocity distribution, power dissipation and Reynolds shear stress. These were done with discharges of 35, 40, 45, 50 and 55 m<sup>3</sup>/h on scale model (i.e. range of 0.34 to 0.54 cfs) or, with no scale, discharges of 1.50, 1.71, 1.93, 2.14 and 2.35 m<sup>3</sup>/s (i.e. range of 53 to 83 cfs). Besides that, longitudinal slopes were of 6, 8, 10 and 12%. All data were collected, prepared and analyzed, providing support to compare hydraulic parameters on a tank for different discharges and slopes, given enough to achieve the evaluation of fish travel efficiency.

An finite element mathematical simulation was prepared and was ran at Flow3D software, developed by FlowScience, in accordance with the physical experiment results and it provided consistence for future experiments at design variations of fishways.

Keywords: Fishways; experimental scale model; Flow Science Flow3D; hydraulic parameters.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
3.1 MECANISMO DE TRANSPOSIÇÃO DE PEIXES (MTP) .....	4
3.2 MODELO REDUZIDO.....	11
3.3 MAPEAMENTO DE VELOCIDADES.....	14
3.4 DISSIPACÃO DE ENERGIA .....	16
3.5 TENSÃO DE CISALHAMENTO .....	17
3.6 MODELAGEM NUMÉRICA.....	19
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
4.1 EXPERIMENTAL.....	22
4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	27
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>30</b>
5.1 CAMPO DE VELOCIDADES DENTRO DO TANQUE.....	31
5.2 CAMPO DE DISSIPACÃO DE ENERGIA DENTRO DO TANQUE .....	37
5.3 CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS DENTRO DO TANQUE .....	45
5.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	60
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>
<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA ECLUSA PARA PEIXES .....	5
FIGURA 2 – ESQUEMA DE MECANISMO DE TRANSPOSIÇÃO DO TIPO ELEVADOR DE PEIXES. FONTE: TRAVADE E LARINIER, 2002. ....	6
FIGURA 3 – ESCADA DE PEIXES DO TIPO DENIL. FONTE: KATOPODIS, 1992. ....	7
FIGURA 4 – MECANISMO DE TRANSPOSIÇÃO DO TIPO TANQUE COM VERTEDOR DO RIO NESTER NA FRANÇA. FONTE: LARINIER, 2001 .....	8
FIGURA 5 – MECANISMO DE TRANSPOSIÇÃO DO TIPO TANQUE COM VERTEDOR. FONTE: KATOPODIS, 1992. ....	8
FIGURA 6 – MECANISMO DE TRANSPOSIÇÃO DE PEIXES DO TIPO CANAL NATURAL. FONTE: LARINIER, 2001 ....	9
FIGURA 7 – MECANISMO DE TRANSPOSIÇÃO DE PEIXES DO TIPO RANHURA VERTICAL SIMPLES LOCALIZADA NO RIO GRANDE NA UHE DE IGARAPAVA .....	10
FIGURA 8 – VISÃO GERAL DO CANAL COM DECLIVIDADE VARIÁVEL COM O EQUIPAMENTO ADV E OS ANTEPAROS DA ESCADA DE PEIXES. ....	23
FIGURA 9 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO TANQUE. ....	23
FIGURA 10 – DIMENSÕES DO TANQUE DA ESCADA DE PEIXES. ....	24
FIGURA 11 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO ADV UTILIZADO. ....	24
FIGURA 12 – EXEMPLO DA SELEÇÃO DOS OUTLIERS EM UM DOS PONTOS LEVANTADOS. ....	25
FIGURA 13 – TANQUES DO MTP DA UHE DE IGARAPAVA. ....	27
FIGURA 14 – MODELO TRIDIMENSIONAL UTILIZADO COMO BASE FÍSICA PARA REPRESENTAÇÃO DO CANAL E DOS SLOTS VERTICAIS. ....	29
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DA MALHA ESCOLHIDA PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS. ....	29
FIGURA 16 – CONDIÇÕES DE CONTORNO ESCOLHIDAS PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS. ....	30
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CAMPO DE VELOCIDADES NO TANQUE DA ESCADA DE PEIXES. ....	31
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE VELOCIDADES PARA A DECLIVIDADE DE 6% ..	32
FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE VELOCIDADES PARA A DECLIVIDADE DE 8% ..	33
FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE VELOCIDADES PARA A DECLIVIDADE DE 10%. ..	34
FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE VELOCIDADES PARA A DECLIVIDADE DE 12%. ..	35
FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS ÁREA COM VELOCIDADE INFERIOR A 1,3 M/S PARA A (A) DECLIVIDADE DE 6% E VAZÃO DE 1,5 M <sup>3</sup> /S E (B) DECLIVIDADE DE 12% E VAZÃO DE 2,35 M <sup>3</sup> /S .....	36
FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO MTP DE IGARAPAVA PARA (A) CAMPO DE VELOCIDADES E (B) REGIÕES COM VELOCIDADE MENOR QUE 1,3 M/S. ....	37
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE DISSIPACÃO DE ENERGIA PARA A DECLIVIDADE DE 6% .....	39
FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE DISSIPACÃO DE ENERGIA PARA A DECLIVIDADE DE 8% .....	40
FIGURA 26 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE DISSIPACÃO DE ENERGIA PARA A DECLIVIDADE DE 10% .....	41
FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE VELOCIDADES PARA A DECLIVIDADE DE 12%. ..	42
FIGURA 28 – REPRESENTAÇÃO DO CAMPO DE DISSIPACÃO DE ENERGIA DENTRO DO TANQUE DO MTP DA UHE DE IGARAPAVA .....	43
FIGURA 29 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ÁREAS COM DISSIPACÃO DE ENERGIA INFERIOR A 191 W/M <sup>3</sup> NAS VAZÕES DE 1,50 M <sup>3</sup> /S (A) E MÁXIMA DE 2,35 M <sup>3</sup> /S (B) PARA DECLIVIDADE DE 6% .....	44
FIGURA 30 – MAPA DE REGIÕES COM VALORES INFERIORES A 191 W/M <sup>3</sup> PARA AS DECLIVIDADE DE (A) 8%, (B) 10%, (C) 12%, (D) MTP DA UHE DE IGARAPAVA. ....	44
FIGURA 31 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS PARA A DECLIVIDADE DE 6% UTILIZANDO TENSÃO MÉDIA PARA CADA FLUTUAÇÃO INSTANTÂNEA. ....	46
FIGURA 32 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS PARA A DECLIVIDADE DE 8% UTILIZANDO TENSÃO MÉDIA PARA CADA FLUTUAÇÃO INSTANTÂNEA. ....	47
FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS PARA A DECLIVIDADE DE 10% UTILIZANDO TENSÃO MÉDIA PARA CADA FLUTUAÇÃO INSTANTÂNEA. ....	48
FIGURA 34 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS PARA A DECLIVIDADE DE 12% UTILIZANDO TENSÃO MÉDIA PARA CADA FLUTUAÇÃO INSTANTÂNEA. ....	49
FIGURA 35 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS MÁXIMA PARA A DECLIVIDADE DE 6% .....	51
FIGURA 36 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS MÁXIMA PARA A DECLIVIDADE DE 8% .....	52

FIGURA 37 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS MÁXIMA PARA A DECLIVIDADE DE 10% . . . . .	53
FIGURA 38 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS MAXIMA PARA A DECLIVIDADE DE 12% . . . . .	54
FIGURA 39 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS PARA A DECLIVIDADE DE 6% . . . . .	55
FIGURA 40 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS PARA A DECLIVIDADE DE 8% . . . . .	57
FIGURA 41 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS PARA A DECLIVIDADE DE 10% . . . . .	58
FIGURA 42 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE VELOCIDADES PARA A DECLIVIDADE DE 12% .	59
FIGURA 43 – REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TENSÃO CISALHANTE DE REYNOLDS PARA O MTP DA UHE DE IGARAPAVA . . . . .	60
FIGURA 44 - RESULTADO DA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA COM A VELOCIDADE EM M/S . . . . .	60
FIGURA 45 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA COM A VELOCIDADE EM M/S E AS DIMENSÕES EM METROS . . . . .	61
FIGURA 46 - COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS . . . . .	62
FIGURA 47 – RESULTADO DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE (M/S) NO MEIO DO TANQUE CENTRAL . . . . .	62

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONTAGENS ABSOLUTAS E RELATIVAS (%) DE PEIXES NO VISOR DA ESCADA DA UHE-IGARAPAVA: TOTAL E NOS PERÍODOS CHUVOSOS (10/2003 – 03/2004) E SECO (07/2003–09/2003 E 04/2004-05/2005) – BIZZOTO, 2006. ....	11
TABELA 2 – RESULTADOS PARA CADA VAZÃO E DECLIVIDADE DA DISSIPACÃO DE ENERGIA USANDO A EQUAÇÃO DE BELL (1973). ....	38

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ADV – *ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETRY*

CFD – *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

CPH – CENTRO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

MTP – MECANISMO DE TRANSPOSIÇÃO DE PEIXES

PCH – PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

RNG – *RENORMALIZED GROUP*

UFMG – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

UHE – USINA HIDRELÉTRICA

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem existido uma grande busca de fontes de energias renováveis numa tentativa de reduzir a produção de energia a base de hidrocarbonetos e dessa forma prover o crescimento econômico sustentável no mundo. Para atender parte dessa necessidade o interesse na energia hidrelétrica aumentou recentemente e isso se reflete no grande número de usinas hidrelétricas que foram construídas como parte de projetos de grande escala (JACKSON E MARMULLA, 2001). Mas como o potencial para se implantar grandes projetos tem se tornado limitado, muitos países estão cada vez mais com foco no desenvolvimento de projetos de pequena escala, geração abaixo de 10MW (DEMIRBAS, 2007), ou para o Brasil, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), com geração entre 1 e 30 MW (ANEEL, 1998)

O Brasil, como país em desenvolvimento, utiliza da energia potencial hidráulica em grandes hidrelétricas como a principal fonte de energia. Estas têm um papel essencial no desenvolvimento do país e o proporciona auto-suficiência na geração de energia elétrica a baixos custos. Em três décadas, de 1975 a 2005, houve um aumento da potência instalada no país de 13.724 MW para quase 69.000 MW (BRONZATTI E NETO, 2008).

O potencial de aproveitamento de energia hidráulica no Brasil é de aproximando de 245 GW (ELETROBRÁS, 2012). Nas regiões Sul e Sudeste do País boa parte deste potencial já foi aproveitado. Entretanto, esta não é a situação da bacia do Rio Amazonas.

Empreendimentos hidrelétricos causam impactos ambientais, pois grande parte da ictiofauna dos rios brasileiros depende da liberdade de movimento ascendente para reprodução (AGOSTINHO et al., 2005). A interferência no ciclo de vida de diversas espécies de peixes e redução nas populações são alguns dos impactos da implantação de barragens.

Sendo assim, a continuidade ecológica, em particular a conectividade longitudinal de cursos d'água se torna o principal fator de restauração em cursos d'água regularizados por barragens (SILVA *et al.*, 2012). A construção de um Mecanismo de Transposição de Peixes (MTP) busca restaurar ao máximo essa conectividade, possibilitando a ocorrência do fluxo ascendente dos peixes migratórios na região da barragem.

O objetivo da construção de um Mecanismo de Transposição de Peixes (MTP) é restaurar ao máximo a conectividade entre trechos de rios interrompidos por barramentos, possibilitando a ocorrência dos fluxos dos peixes migratórios na região da barragem. Para que isso ocorra um MTP deve ser eficiente na atração de peixes, permitindo sua passagem de modo seguro, sem

danos e com um custo mínimo de energia e de tempo. Portanto, o sucesso de um projeto de MTP depende tanto do estudo da capacidade natatória de peixes quanto da análise dos parâmetros hidráulicos e estruturais mais adequados do mecanismo para a passagem aos peixes migrantes durante a piracema (SILVA *et al.*, 2012).

No Brasil vários tipos de MTP são utilizados, dentre eles tem-se a escada com ranhura vertical em algumas barramentos. Esse sistema se tornou atraente devido ao fato dos peixes conseguirem transpor em diferentes alturas dentro da lâmina de fluido. Como o país possui uma grande diversidade de peixes com características muito diferentes, esse tipo de escada pode atender melhor a essas espécies. Segundo Armstrong *et al.* (2010) a declividade usual nesse tipo de sistema é de 10%, mas pode ser utilizado com declividade entre 5% e 12,5%.

O estudo da eficiência de subida do peixe pelo MTP depende da condição de entrada do sistema, do comprimento do mecanismo a ser percorrido, da existência de áreas de descanso e de parâmetros hidráulicos dentro do tanque. Dentro desses parâmetros estão o monitoramento da velocidade, da dissipação de energia e da tensão cisalhante de Reynolds dentro do tanque.

No intuito de verificar o comportamento hidráulico de um MTP do tipo escada com ranhura vertical, este trabalho analisa os campos de velocidades, os níveis de dissipação de energia e os campos de tensão de cisalhamento de Reynolds para diferentes declividades e vazões. Estudos variados fazem estas verificações por projeto específico, para uma declividade específica, ou avaliando um ou mais destes parâmetros citados, sendo assim busca-se correlacionar os diferentes cenários e os diferentes parâmetros para uma análise mais profunda deste tipo de escada de peixes.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 *Objetivo geral***

Verificar a influência da variação da vazão e da declividade no comportamento hidráulico de um mecanismo de transposição de peixes do tipo ranhura vertical através da análise de parâmetros hidráulicos. Com isso pretende-se definir as condições hidráulicas limites para o funcionamento do sistema de maneira a permitir a passagem dos peixes.

### **2.2 *Objetivos específicos***

- Determinar a condição limite de vazão e declividade para não superar a velocidade limite admissível dentro do tanque;
- Determinar a condição limite de vazão e declividade para não superar a dissipação de energia limite admissível dentro do tanque;
- Determinar a condição limite de vazão e declividade para não superar a tensão cisalhante de Reynolds limite admissível dentro do tanque;
- Calibração de um modelo computacional para futuros trabalhos com parâmetros construtivos e hidráulicos diversos.

### **3 REVISÃO DA LITERATURA**

#### **3.1 Mecanismo de Transposição de Peixes (MTP)**

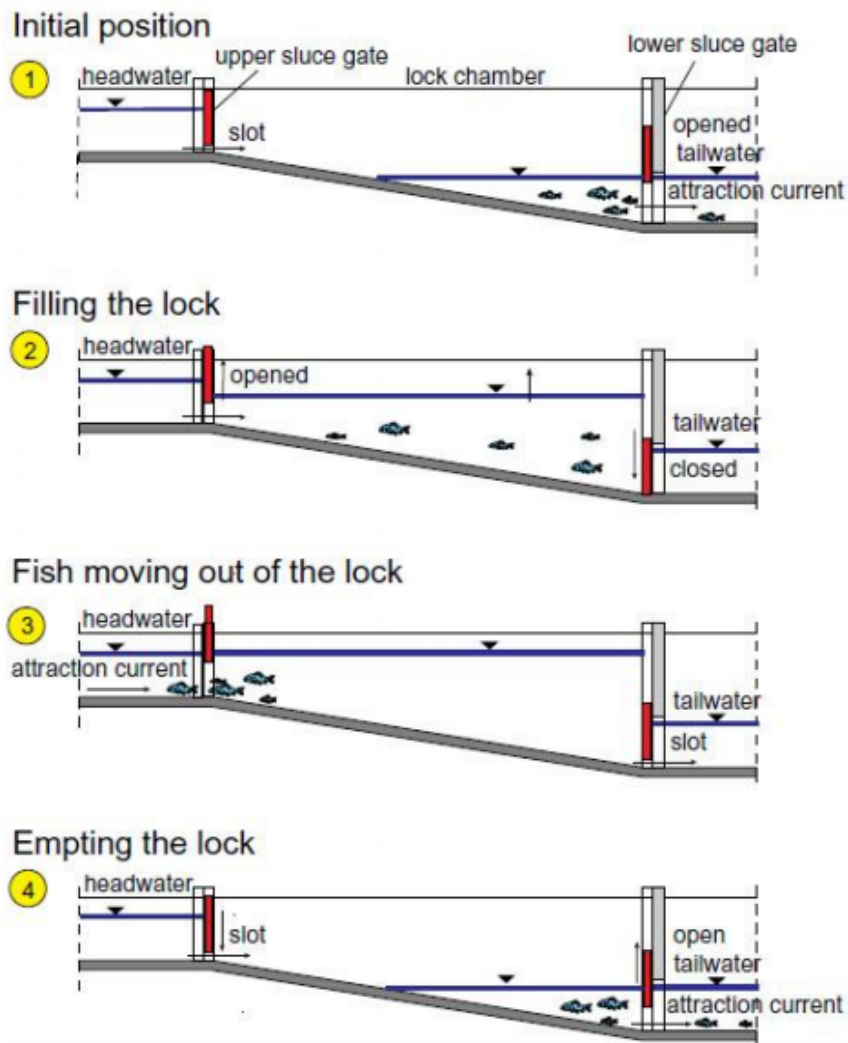
Larinier e Travade (1999), definiram um Mecanismo de Transposição de Peixes como sendo um dispositivo para atrair e conduzir seguramente a migração de peixes: trófica e reprodutiva, aos seus ambientes.

Clay em 1995, diz que um Mecanismo de Transposição de Peixes busca restaurar a conectividade dos rios e mitigar os efeitos de um barramento nas populações dos peixes, e que funcionam como facilitador da transposição dos peixes frente as barreiras, tanto de montante para jusante quanto no sentido contrário.

Estas barreiras podem ser prejudiciais para o nível populacional dos peixes diádromos (peixes que migram entre águas doces e salgadas) e peixes patomódromos (peixes que migram entre rios e lagos). Os peixes migratórios por sua vez usualmente possuem requerimentos de habitat dependendo do nível do seu estágio de vida ou processo (jovem, adulto, maturação sexual e reprodução) (LARINIER, 2001).

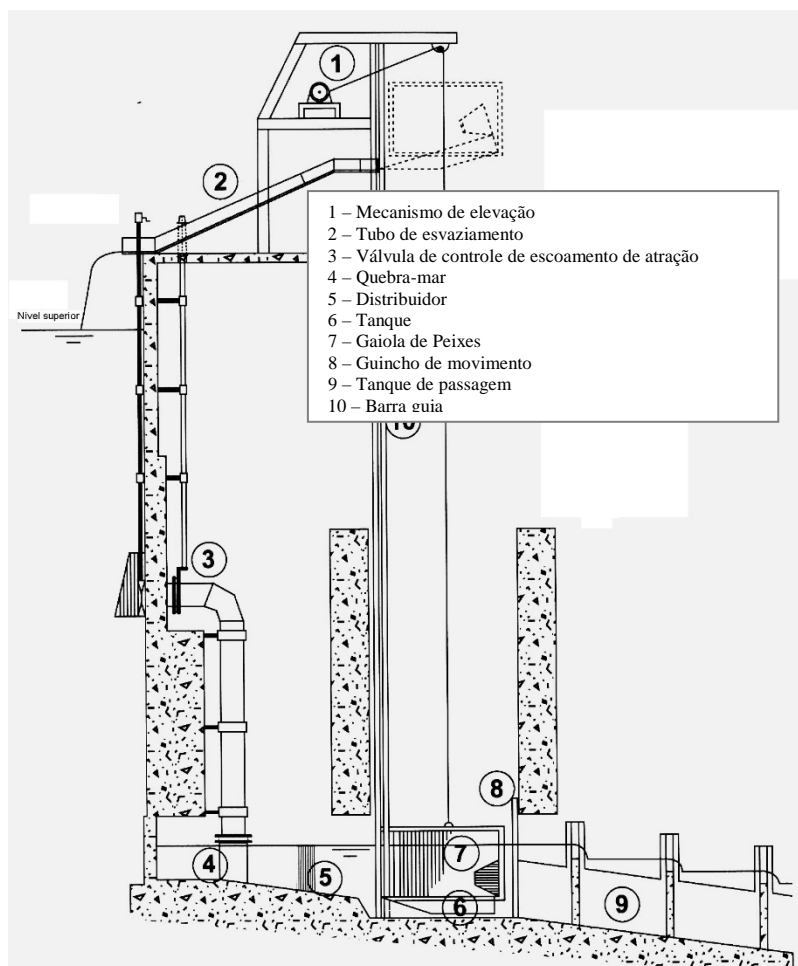
Os tipos de Mecanismos de Transposição de Peixes (MTP) podem ser do tipo Denil, tanque com vertedouro, com ou sem rasgo e/ou furo, e ranhura vertical, além de eclusas e elevadores para peixes. Todos esses mecanismos possuem características específicas que os tornam mais ou menos seletivos.

Os Mecanismos de Transposição de Peixes do tipo eclusas são semelhantes aos utilizados por navios. Esse tipo de sistema é equipado com duas câmaras interligadas que estão em comunicação com o reservatório e o canal de fuga por meio de comportas. Assim, os peixes são atraídos para a entrada da eclusa, por meio de um sistema que cria um escoamento com maior velocidade, conhecido como jato de atração, a comporta de jusante é fechada, e a comporta de montante começa a ser aberta para que a água encha a ligação entre as duas câmaras e chegue ao nível de montante. Os peixes se deslocam para o reservatório e a comporta de montante se fecha e a de jusante se abre iniciando todo o processo. A principal diferença entre a eclusa de navios e de peixes é que a segunda necessita de um jato de atração para induzir as diferentes espécies a entrarem no sistema (VIANA, 2007). A Figura 1 mostra o esquema de funcionamento de uma eclusa.



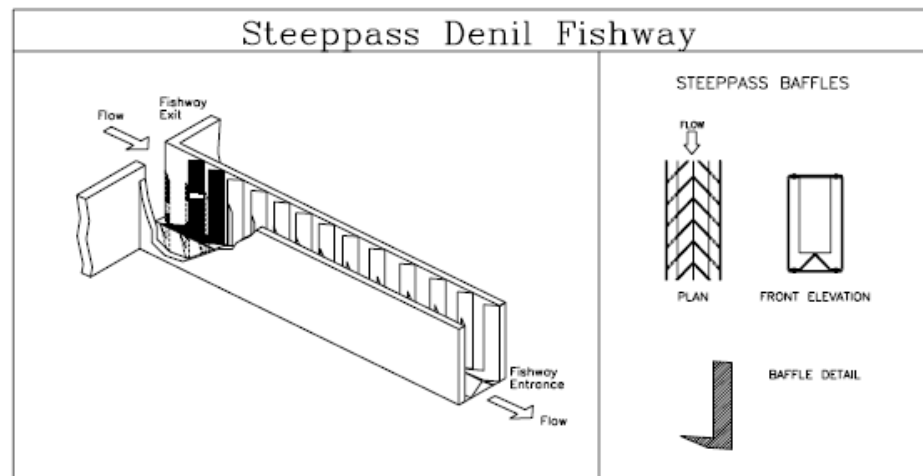
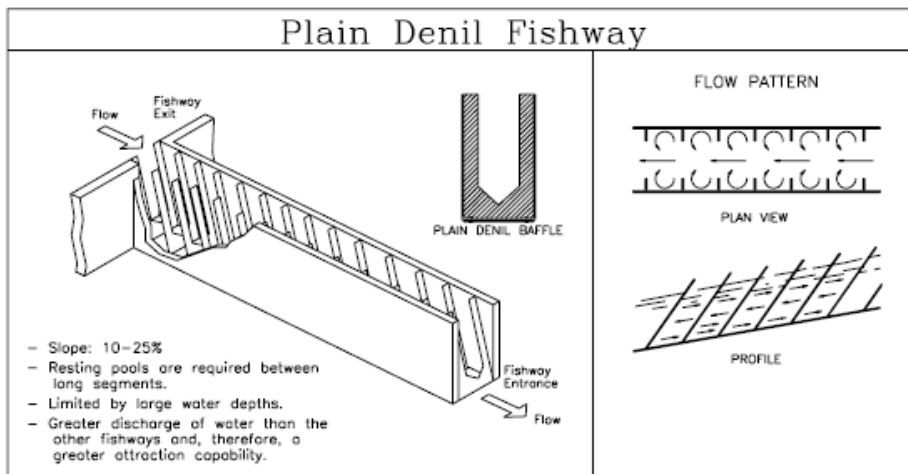
**Figura 1** – Esquema de funcionamento de uma eclusa para peixes. (FAO/DVWK, 2002)

Nos elevadores, os peixes são atraídos pelo jato de atração, para uma câmara onde a caçamba fica submersa. Em seguida uma comporta se fecha, impedindo que os peixes retornem, e a caçamba é conduzida para o reservatório superior ou para caminhões tanques, que fazem o percurso até o reservatório, como pode ser observado na Figura 2.



**Figura 2** – Esquema de mecanismo de transposição do tipo elevador de peixes. Fonte: Travade e Larinier, 2002.

As escadas são constituídas por um canal com declividade que permita o escoamento a uma velocidade de escoamento compatível com a capacidade de nado dos peixes. Esse canal é separado por anteparos formando um conjunto de tanques sequenciais. Os tipos mais comuns de escada são do tipo Denil, tanque com vertedor, canal natural e ranhura vertical. Os anteparos da escada do tipo Denil são inclinados em 45 graus e possuem uma abertura na região central. Esse tipo de escada é construído normalmente com grandes inclinações e, portanto, apresenta velocidades elevadas, tornando a escada seletiva do ponto de vista da passagem de diferentes espécies de peixes. Um exemplo de escada do tipo Denil pode ser observada na Figura 3.

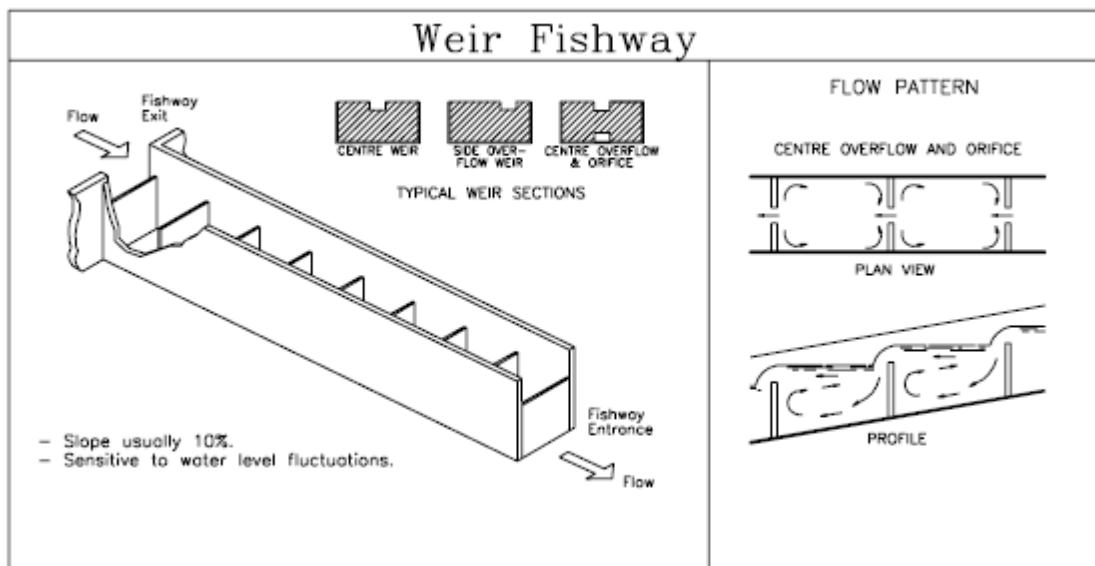


**Figura 3** – Escada de Peixes do tipo Denil. Fonte: Katopodis, 1992.

No caso da escada do tipo tanque com vertedor, os anteparos podem ter aberturas e orifícios. Nesse sistema, os peixes têm de saltar, sobre o anteparo ou passar pelas aberturas enfrentando velocidades elevadas. As Figura 4 e Figura 5 mostram escadas do tipo tanque com vertedor do rio Nester na França.



**Figura 4** – Mecanismo de Transposição do Tipo Tanque com Vertedor do rio Nester na França. Fonte: Larinier, 2001



**Figura 5** – Mecanismo de Transposição do Tipo Tanque com Vertedor. Fonte: Katopodis, 1992.

A escada do tipo canal natural é considerada, por alguns biólogos e engenheiros, como um dos melhores mecanismos de transposição para peixes. Isso se deve à grande semelhança com um tributário e seus anteparos serem construídos com pedras e terra. No entanto, esse sistema necessita de grande área para sua instalação pelo fato do canal ter de ser construído com declividades muito pequenas, visto que maiores declividades elevariam as velocidades de escoamento promovendo transporte de sedimentos e erosão das margens. Assim, seu

comprimento se torna muito longo sendo necessário uma área grande para sua construção. Esse tipo de escada pode ser observada na Figura 6.



**Figura 6** – Mecanismo de Transposição de Peixes do Tipo Canal Natural. Fonte: Larinier, 2001

A escada do tipo ranhura vertical possui anteparos de diferentes formas inseridas em suas paredes. Como existe uma abertura entre esses anteparos, os peixes podem passar de um tanque para outro em diferentes alturas de lâmina de água e, assim, nadar em uma velocidade mais adequada a sua capacidade. Além disso, ocorre a formação de áreas de descanso em cada tanque, necessárias para a recuperação de energia pelos peixes para continuar transpondo o sistema. Pela Figura 7 pode observar a escada do tipo ranhura vertical simples localizada no rio Grande na Usina Hidrelétrica (UHE) de Igarapava.



**Figura 7** – Mecanismo de Transposição de Peixes do Tipo Ranhura Vertical Simples localizada no Rio Grande na UHE de Igarapava  
Fonte: CEMIG, 2002

A escada de peixes do tipo ranhura vertical da UHE de Igarapava possui um longo monitoramento das espécies que utilizam o sistema. A Tabela 1 reproduz o resumo de um ano de observações de espécies encontradas nessa escada de peixes realizadas por Bizzoto, 2006, nesta dissertação é possível verificar a descrição dessas espécies.

**Tabela 1** – Contagens Absolutas e Relativas (%) de Peixes no Visor da Escada da UHE-Igarapava: Total e nos períodos chuvosos (10/2003 – 03/2004) e seco (07/2003–09/2003 e 04/2004-05/2005) – Bizzoto, 2006.

Espécies	Total		Período chuvoso		Período seco	
	Absoluta	%	Absoluta	%	Absoluta	%
<b>Migradoras</b>						
<i>Pimelodus maculatus</i>	20.702	33,6	11.420	55,1	9.282	44,9
<i>Leporinus octofasciatus</i>	19.358	31,4	17.214	89	2.144	11
<i>Leporinus friderici</i>	2.778	4,5	2.108	75,8	670	24,2
<i>Prochilodus lineatus</i>	1.939	3,1	1.570	81	369	19
<i>Salminus hilarii</i>	95	0,2	92	96,8	3	3,2
<i>Colossoma macropomum</i>	27	0,01	21	77,7	6	22,3
<i>Leporinus elongatus</i>	2	0	2	100	0	0
Sub-total	44.901	72,8	32.427		12.474	
<b>Não migradoras</b>						
<i>Bryconamericus stramineus</i>	7.853	12,7	7.747	98,6	106	1,4
<i>Astyanax</i> spp.	1.484	2,4	1.459	98,3	25	1,7
<i>Cichla</i> spp.	1.155	1,9	1.105	95,6	50	4,4
<i>Hypostomus</i> spp.	1.113	1,8	926	83,1	187	16,9
<i>Metynnis maculatus</i>	885	1,4	849	99,2	36	0,8
<i>Schizodon nasutus</i>	131	0,3	64	48,8	67	51,2
<i>Galeocharax knerii</i>	52	0,1	15	28,8	37	71,2
<i>Clarias gariepinus</i>	50	0,1	50	100	0	0
Sub-total	12.723	20,7	12.215		508	
Não identificadas	3.994	6,5	3.185	79,7	809	20,3
Total	61.618	...	47.827	78	13.791	22

Estas espécies utilizam o mecanismo de transposição de peixes de Igarapava na condição usual de funcionamento da mesma.

### 3.2 Modelo Reduzido

Os modelos reduzidos são utilizados para dar subsídios a projetos, pois, conseguem demonstrar os fenômenos a serem estudados (STREETER E WYLIE, 1980).

Estudos experimentais que utilizam modelo reduzido se tornam mais simples e é possível a redução de seus custos. A maioria destes trabalhos utilizam água como fluido se tornando econômico e de fácil manuseio (KOBUS, 1980).

No entanto, para se trabalhar com modelos reduzidos é necessário obedecer à semelhança dinâmica entre o modelo e protótipo. Isto é conseguido com a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica. Para isto é necessário que as forças, envolvidas no escoamento, devam ser as mesmas em pontos correspondentes, ou seja, parâmetros adimensionais, Mach, Reynolds,

Froude e Weber, etc, devam assumir os mesmos valores no modelo e no protótipo. Entretanto, isto não é possível, exceto na escala 1:1. Assim, define-se que deverá ser mantida a relação de semelhança considerando as forças que são mais importantes para cada o sistema (Streeter e Wylie, 1980).

Na escolha da relação de semelhança em um modelo reduzido, escolhendo as forças mais importantes, as demais relações de semelhança, relacionadas a forças de menos atenção ao que está sendo estudado, em geral, costumam ser distorcidas em função da dificuldade de manter mais de uma relação de semelhança em um mesmo modelo. Sendo comum que diferentes modelos reduzidos, com diferentes relações de semelhança, sejam feitos quando outras forças também são importantes para os estudos.

Quando se deseja correlacionar a razão entre as forças de inércia e viscosa utiliza-se o numero de Reynolds (Eq. 1).

$$Re = \frac{\rho \bar{V} L}{\mu} = \frac{\bar{V} L}{\nu} \qquad L = \frac{4A}{P} \qquad (1)$$

Onde:

$\rho$  é a massa específica [M/L<sup>3</sup>],

$\bar{V}$  é a velocidade média [L/T],

$L$  é o comprimento característico [L],

$\mu$  é a viscosidade absoluta [FT/L<sup>2</sup>]

$\nu$  é a viscosidade cinemática [L<sup>2</sup>/t]

$A$  é área [L<sup>2</sup>] e  $P$  é o perímetro [L].

Em ensaios hidrodinâmicos e aerodinâmicos busca-se a razão entre a força de pressão e força de inércia descrita pelo número de Euler (Eq. 2)

$$Eu = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \qquad (2)$$

Onde:

$\Delta P$  é a pressão local menos a pressão de corrente livre [F/L<sup>2</sup>]

$\rho$  é a massa específica [M/L<sup>3</sup>]

$V$  é a velocidade média [L/T].

Em estudos de cavitação correlaciona-se a pressão local com a pressão de vapor do líquido com a força de inércia (Eq. 3).

$$Ca = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3)$$

Onde:

$p$  é a pressão de corrente [F/L<sup>2</sup>]

$p_v$  é a pressão de vapor [F/L<sup>2</sup>]

$\rho$  é a massa específica [M/L<sup>3</sup>]

$V$  é a velocidade média [L/T].

Em condutos livres o número de Froude é utilizado por ser a razão entre as força de inércia e força gravitacional (Eq. 4).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad L = \frac{4A}{P} \quad (4)$$

Onde:

$V$  é a velocidade média [L/T],

$g$  é a aceleração da gravidade [L/T<sup>2</sup>],

$L$  é o comprimento característico [L],

$A$  é área [L<sup>2</sup>] e  $P$  é o perímetro [L].

O número de Weber correlaciona a razão entre a força de inércia e a tensão superficial (Eq. 5).

$$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \quad (5)$$

Onde:

$\rho$  é a massa específica [M/L<sup>3</sup>],

$V$  é a velocidade média [L/T],

$L$  é o comprimento característico [L],

$\sigma$  é a tensão superficial [F/L].

O número de Mach caracteriza os efeitos de compressibilidade no escoamento correlacionando a razão entre a força de inércia e força de compressibilidade (Eq. 6).

$$M = \frac{V}{C} = \frac{V}{\sqrt{\frac{dp}{d\rho}}} = \frac{V}{\sqrt{\frac{E_v}{\rho}}} \quad \text{ou} \quad M^2 = \frac{\rho V^2 L^2}{E_v L^2} \quad (6)$$

Onde:

$V$  é a velocidade do escoamento [L/T],

$C$  é a velocidade local do som [L/T],

$\rho$  é a massa específica [M/L<sup>3</sup>],

$V$  é a velocidade média [L/T],

$E_v$  é a compressibilidade [F/L<sup>2</sup>],

$L$  é o comprimento característico [L].

Como este trabalho é realizado em um conduto livre, a análise de similaridade a ser correlacionada será feita utilizando o número de Froude.

### **3.3 Mapeamento de Velocidades**

A avaliação dos campos de velocidades é de fundamental importância para a passagem de peixes, que por natureza possuem capacidade natatória limitada. O tempo e a velocidade com que o peixe sofre fadiga são usados para cálculo de sua velocidade crítica natatória (Plaut, 2001). O valor da velocidade de escoamento não deve ultrapassar o valor limite suportado pelo animal. Assim, de acordo com Santos (2004), a falta de referências para peixes neotropicais direcionou a utilização de uma velocidade de 2,0 m/s. Esse valor está em conformidade com o preconizado por Bell (1973) que mostra que a velocidade média máxima para que o salmão consiga atravessar um MTP atinge o patamar de 2,0 m/s. Em estudos com peixes neotropicais,

Santos, *et. al.* (2008) apresentaram a capacidade natatória do *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo). Em 2012, Santos *et. al.*, publicaram um trabalho de levantamento de velocidade natatória de três espécies neotropicais. Nesse trabalho observou-se que as espécies testadas conseguiram imprimir velocidade superior as de clima temperado apresentadas por outros pesquisadores, para um mesmo comprimento do peixe. No entanto, as espécies de clima temperado testadas possuem comprimentos maiores e assim podem superar a capacidade natatória dos peixes de clima neotropical.

Conhecer a condição de escoamento dentro do tanque é de suma importância para que os peixes consigam transpor e descansar em regiões de baixas velocidades. Pensando nisso, Alvarez-Vázquez, *et al.* (2007), realizaram simulações computacionais do escoamento de uma nova configuração da escada do tipo ranhura vertical, para duas posições de anteparo e comprimento de tanque. Após o estudo encontrou-se um novo desenho de escada onde essas regiões de recirculação são minimizadas, aumentando, assim, a área de descanso para os peixes.

Viana, Martinez e Faria (2010) elaboraram um trabalho experimental visando verificar a proposição apresentada por Alvarez-Vázquez, *et al.* (2007). Para isso fez-se o levantamento do comportamento hidráulico, pelo levantamento do campo de velocidades, desse desenho de escada de peixes, em diferentes declividades, variando-se alguns parâmetros hidráulicos importantes para um MTP, tais como a vazão adimensional, dissipação de energia, funcionamento como escoamento uniforme, dentre outros. Os diferentes cenários foram obtidos por meio da variação da declividade e da vazão que passa pelos tanques. Os valores encontrados foram diferentes dos obtidos por Alvarez-Vázquez. Mas foi dada continuidade ao trabalho com Tomé *et al* (2013), que buscaram correlacionar os parâmetros vazão adimensional, dissipação de energia e velocidade média, dentro do tanque, com a declividade, encontrando-se equações que representam estes parâmetros dentro do sistema.

Em 2016 Marriner *et. al.* levantaram os parâmetros hidráulicos de uma escada de peixes do tipo ranhura vertical em Quebec no Canadá. Foram levantados os tanques onde ocorreram condições de escoamento uniforme e outros parâmetros para subsidiar a simulação computacional em *Computational Fluid Dynamics* (CFD) do campo de velocidade dentro do tanque, a energia cinética turbulenta e a quantidade de movimento dos vórtices.

Para correlacionar a passagem de peixes dentro de um mecanismo de transposição, Gao *et. al.* (2016) promoveram a simulação computacional de tanques desse sistema e utilizaram dados de

trajetória apresentados por Rodriguez et. al. (2011) para verificar as condições que os peixes enfrentariam na passagem pelos tanques. Além disso, afirmam que é amplamente aceito o conceito de se estudar a escada de peixes apenas pelas dimensões bidimensionais, desprezando as variações na vertical. Sendo que, após a entrada dos peixes na escada, eles tendem a buscar a melhor profundidade para sua travessia (pressão hidrodinâmica) e preferencialmente nada pela mesma camada por toda a escada, em geral próxima ao fundo do canal. Isto implica que a trajetória do peixe varia principalmente no plano horizontal. Por este motivo para os estudos aqui desenvolvidos as variações do plano vertical foram negligenciadas.

### **3.4 Dissipação de Energia**

Um outro parâmetro importante para caracterizar os limites de funcionamento da escada de peixes é a dissipação de energia, que segundo Bell (1973) não pode passar de 191 W/m<sup>3</sup>. Pode-se calcular essa dissipação pela Equação 7.

$$k = \frac{Q\gamma\Delta h}{BLy_0} \quad (7)$$

Onde:

$\gamma$  é peso específico da água (N/m<sup>3</sup>),

$B$  a largura do tanque (m),

$L$  o comprimento do tanque,

$\Delta h$  perda de carga (m),

$y_0$  a altura média da lamina d'água(m).

Afinal um bom projeto de MTP do tipo ranhura vertical deve possuir velocidades máximas próximas às máximas velocidades desenvolvidas pelas espécies alvo. Também deve prever que existam áreas que possibilitem o descanso do peixe, caso necessário, antes de fazer a travessia de um tanque ao outro. Nessas áreas os valores de dissipação de energia do escoamento devem

ser baixos (COLETTI, 2005). Para permitir a passagem de peixes em um sistema, a dissipação de energia deve ser limitada. Como não existem trabalhos de levantamento desse parâmetro para peixes neotropicais o limite é definido com dados levantados para salmão. Existem vários autores que apresentam valores máximos de dissipação de energia dentro do sistema. No estudo de Rodrigues *et. al.* (2006) verifica-se a influência da declividade e abertura da ranhura no valor de dissipação de energia. Os valores considerados pelos autores como limitantes foram valores máximos de  $150 \text{ W/m}^3$  para passagem de truta e  $200 \text{ W/m}^3$  para salmão. No entanto, não realizando testes com estas espécies para verificação do comportamento. Bernard *et. al.* (2013) realizou estudos em bueiros para verificar condição de escoamento com colocação de pedra para servir de anteparos, nesse trabalho valor adotado máximo poderia atingir o patamar de  $239,4 \text{ W/m}^3$  ( $5 \text{ ft-lb/ft}^3/\text{s}$ ). Na Inglaterra Armstrong *et. al.* (2010) levantaram dados para a elaboração de um guia para passagem de peixes, e nesse trabalho definiram que na área de descanso esse valor não deve ser superior a  $100 \text{ W/m}^3$ .

Tolentino *et al* (2014) apresentaram um estudo do comportamento hidráulico de um MTP do tipo escada com ranhura vertical, com o objetivo de analisar os campos de velocidade, os níveis de dissipação de energia e os campos de tensão de cisalhamento de Reynolds para dois valores de declividade, 6% e 12%. Os valores da velocidade são obtidos experimentalmente em um modelo reduzido de MTP utilizando-se um sistema de medição de velocidades ADV (Acústico Doppler Velocímetro). Os valores medidos de velocidade são pós-processados permitindo a geração de mapas de velocidades em um tanque. Os mapas de velocidade permitem estimar os níveis de dissipação de energia e de tensão de cisalhamento de Reynolds. A análise comparativa dos parâmetros hidráulicos obtidos para os dois valores de declividade permite avaliar a adequação da inclinação dos tanques do MTP para a transposição eficiente de peixes. Os resultados obtidos nesse trabalho mostram que a declividade de 6% leva a campos de velocidade mais compatíveis com a capacidade natatória dos peixes de rios brasileiros.

### **3.5 Tensão de Cisalhamento**

Além dos parâmetros citados, a turbulência pode aumentar o custo energético de locomoção dos peixes a níveis extremamente altos, causando danos corporais ou até mesmo a morte destes organismos (SILVA *et. al.* 2012). A Tensão de Cisalhamento de Reynolds está relacionada à

transferência contínua de momentos entre massas de água com viscosidades adjacentes, sendo que estas massas de água possuem diferentes velocidades. Essa tensão exerce uma força paralelamente ao corpo do peixe, o que pode causar uma forte interferência no seu desempenho natatório e na sua estabilidade. O impacto da tensão de cisalhamento depende da sua direção em relação ao corpo do organismo. Silva *et. al.* (2011) relata que a componente longitudinal da tensão de cisalhamento de Reynolds ( $\tau_{xy}$ ) é a que afeta principalmente ao peixe, onde a direção x corresponde a longitudinal, e y a transversal ao canal.

Nos escoamentos turbulentos, o valor da velocidade varia em torno de um valor médio, independente do ponto ou direção a serem considerados (PINTO, 2010). Sendo assim, a flutuação das velocidades fornece a informação de onde há zonas de maior ou menor turbulência. Portanto, a tensão de cisalhamento de Reynolds num tanque de MTP pode ser obtida a partir das médias das flutuações de velocidade e é dada pela Equação 8.

$$\tau_{x,y} = -\rho \overline{u'v'} \quad (8)$$

Onde:

$\rho$  é a massa específica (kg/m<sup>3</sup>),

$u'$  é a flutuação da velocidade do escoamento na direção x (m/s),

$v'$  é a flutuação da velocidade do escoamento na direção y (m/s).

Sanagiotto (2007) faz o levantamento da tensão cisalhante dentro do canal de um modelo reduzido da escada de Igarapava, na escala de 1/5 em laboratório. Nesse trabalho encontrou valores de tensão de Reynolds na maior parte do tanque está entre -5 e 5 N/m<sup>2</sup>, e no escoamento principal 30 N/m<sup>2</sup>, porém são valores correspondentes a escala do modelo, porém afirma que a transposição dos valores de tensão para a escala do protótipo podem ser feita pela correlação direta com a escala. Neste trabalho, a autora utilizou a flutuação instantânea da velocidade para a determinação da tensão de Reynolds, e em seguida a média das tensões encontradas. Duarte *et. al.* (2014) levantaram a tensão cisalhante de Reynolds dentro do tanque em laboratório. O segundo autor, ainda comparou com a localização preferencial da espécie *Leporinus reinhardti*. No estudo de Duarte *et. al.* (2014) a vazão utilizada foi de 20 l/s e, para a determinação da

tensão, se utilizou a flutuação máxima das velocidades em um canal com tanques de 1,08 m de comprimento e 0,87 m de largura e declividade de 4,5%.

Estudos mostram que a tensão de cisalhamento de Reynolds tem sido um parâmetro muito importante, com resultados significativos capazes de explicar variações no tempo de transposição dos peixes. Em experimentos realizados em tanques com placas defletoras e diferentes arranjos de orifícios, a tensão de cisalhamento de Reynolds tem sido uma das variáveis hidráulicas cuja variação tem mostrado influência no comportamento dos peixes. Nos resultados, tanto a tensão de cisalhamento de Reynolds como a intensidade de turbulência são responsáveis pelo aumento de 39% no tempo gasto na passagem de peixes pequenos em tanques com orifícios alternados, sendo que, para peixes maiores, a tensão é o único fator que tem influência relevante no tempo de passagem, podendo causar variações de até 9% para o mesmo tipo de sistema (SILVA *et al.*, 2012).

Segundo Cada *et al* (1999), a tensão cisalhante de Reynolds encontrada na natureza são baixas, mais frequentemente inferiores a 100 Pa. Esse valor de tensão pode ser facilmente suportado pelos peixes, porém valores superiores a 500 Pa podem causar danos. Segundo Silva *et al.* (2012) tensões superiores a 1.000 Pa podem causar lesões e morte aos peixes.

### **3.6 Modelagem Numérica**

O uso das técnicas numéricas tem sido um avanço para a solução de problemas complexos da engenharia e da física, e muito tem se discutido com relação as vantagens e desvantagens dos métodos puramente numéricos e aqueles puramente laboratoriais, e o que se conclui é que as melhores soluções buscam atrelar os resultados de laboratório com os resultados das técnicas numéricas (MALISKA, 1995). E é justamente o que é proposto no presente trabalho, os resultados de laboratório serem utilizados como parâmetro de validação das simulações numéricas.

O programa computacional utilizado para a dinâmica dos fluidos computacionais (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) nessa dissertação é o FLOW3D 11.0.4 desenvolvido pela Flow Science, este utiliza o método dos volumes finitos para a resolução das equações diferenciais de segunda ordem, não lineares e transientes de movimento. A solução numérica destas

equações envolve a aproximação de vários termos com expressões algébricas. Os resultados destas aproximações são resolvidas aproximando do resultado do problema original, este processo é conhecido como simulação, uma série de algoritmos para a solução numérica das equações de continuidade de movimento fazem parte do FLOW3D.

As equações governantes que regem o escoamento em canais de superfície livre são as equações de continuidade e a de Navier-Stokes, considerando as hipóteses de fluido newtoniano, escoamento incompressível e propriedades físicas constantes.

Para o caso turbulento, como o caso de um escoamento no interior de escada de peixes são utilizadas as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds. A equação da continuidade (9) e a equação da quantidade de movimento (10) são apresentadas abaixo.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (10)$$

Onde:

$u_i$  é a componente da velocidade média na direção  $x_i$ ,

$u'_i$  é a flutuação da velocidade na direção  $x_i$ ,

$p$  é a pressão estática média, e

$t$  é o tempo.

Neste trabalho, foi utilizado o modelo de turbulência RNG (*Renormalized Group*), similar ao modelo k- $\epsilon$ , 0061s constantes da equação são derivadas explicitamente no modelo RNG, já no k- $\epsilon$  as constantes são encontradas empiricamente, este modelo é utilizado para representar o

termo  $-\overline{u'_i u'_j}$  de (10). As equações de transporte deste modelo, associadas às equações de governo, formam um sistema fechado.

As equações utilizadas para o modelo k- $\varepsilon$ , neste trabalho estão descritas em (11), (12) e (13).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \underbrace{v_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_P - \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

Onde:

$P$  é o termo de produção de energia cinética turbulenta, e

$\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $c_{1\varepsilon}$ ,  $c_{2\varepsilon}$  e  $c_\mu$  são constantes que são determinadas explicitamente no modelo.

Uma malha computacional discretiza efetivamente o espaço físico. Cada parâmetro do fluido é representado na malha por uma variação de valores pelos pontos discretos. Considerando que os parâmetros físicos de um fluido varia continuamente no espaço, uma malha com espaçamento fino entre os nós consegue uma melhor representação da realidade do que uma malha mais grosseira.

Reduzir o espaçamento entre *grids*, ou refinar a malha para o mesmo espaço físico representa mais elementos e nós, e, conseqüentemente, aumenta o tamanho do modelo numérico. Considerando as variações de projeto, o poder de hardware computacional, e os prazos finais o refinamento de grid acaba sendo escolhido buscando um refinamento razoável que consiga balancear estes aspectos citados.

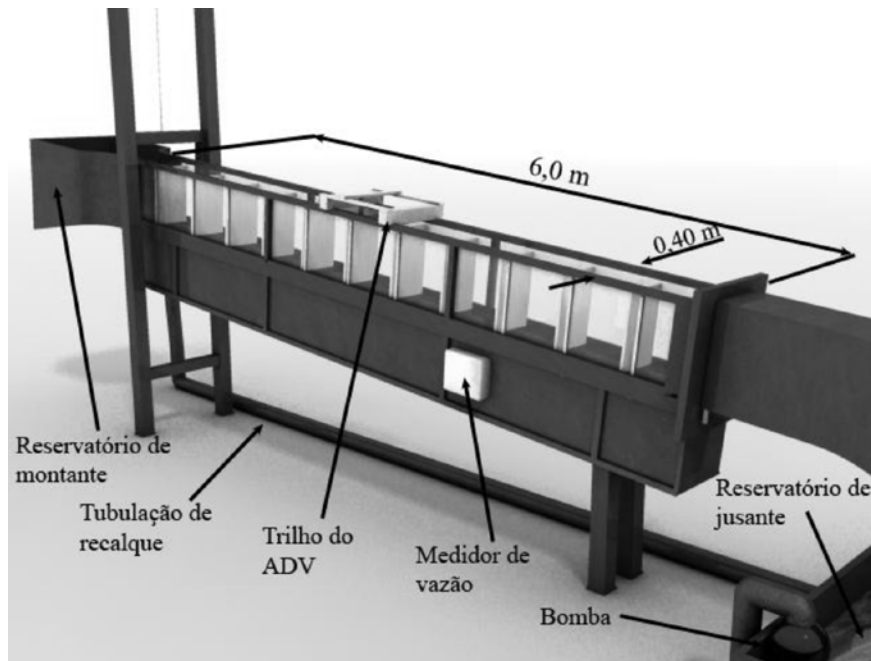
Com o avanço de hardware dos computadores as modelagens e as simulações matemáticas têm se tornado cada dia mais utilizados por aumentar a facilidade de modificação de projetos,

desenhos, designs de aeronaves, automóveis e também para o uso em diversas áreas da hidráulica. Porém, mesmo com todos os avanços, a tecnologia deve ser utilizada com cautela, já que, nem sempre, os modelos matemáticos conseguirão representar com toda a exatidão todos os parâmetros envolvidos da vida real, sendo, portanto, recomendado os experimentos laboratoriais para a validação dos modelos matemáticos. E, principalmente, para projetos de grande complexidade, a simulação computacional não pode substituir as simulações em escala, de modelos reduzidos. A modelagem numérica pode ser utilizada para escolha do melhor projeto/desenho, mas esta deve ser seguida de um modelo reduzido antes de sua implantação, (MALISKA, 1995).

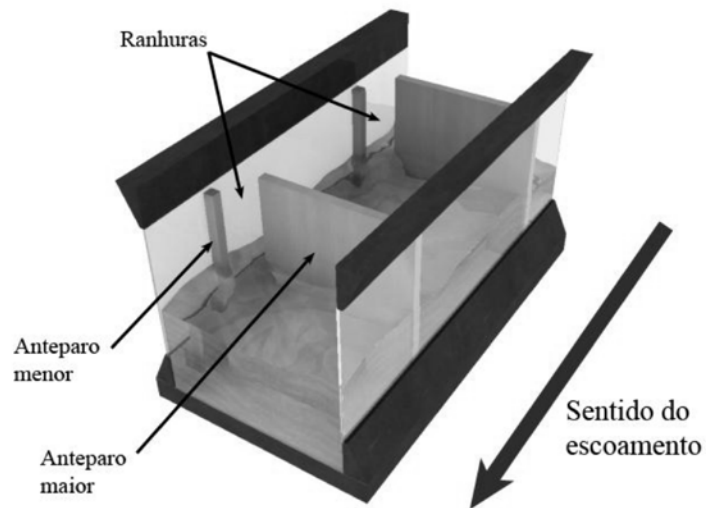
## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Experimental**

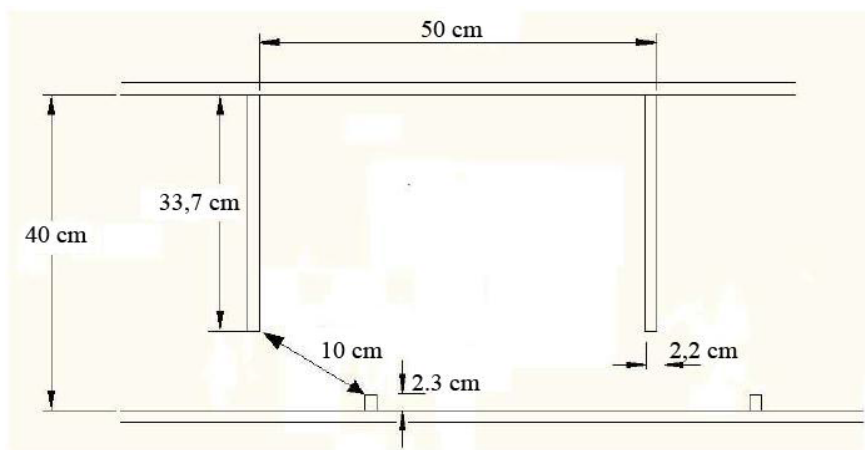
O experimento consiste na obtenção de valores de velocidade e de flutuação da velocidade em um tanque de MTP de ranhura vertical por meio do sistema de medição de velocidade de escoamento (ADV). Para tanto, utiliza-se um canal construído em aço e vidro, como pode ser visto na Figura 8. O canal possui 6,0 m de comprimento e 0,40 de largura. Uma talha mecânica permite elevar o canal na região do reservatório de montante, alterando a sua declividade. Os tanques são divididos por anteparos de madeira formando onze tanques com 0,50 m de comprimento. O comprimento da ranhura ( $b_0$ ) é de 0,10 m. Os anteparos possuem espessura de 22 mm e 33,7 cm de comprimento, como pode ser observado na vista superior mostrada nas Figura 9 e Figura 10.



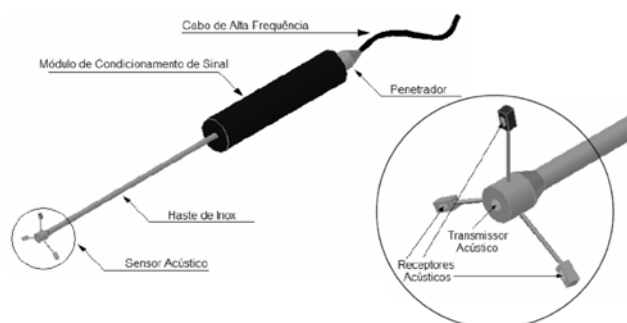
**Figura 8** – Visão geral do canal com declividade variável com o equipamento ADV e os anteparos da escada de peixes.



**Figura 9** – Esquema de funcionamento do tanque.



**Figura 10**– Dimensões do tanque da escada de peixes.

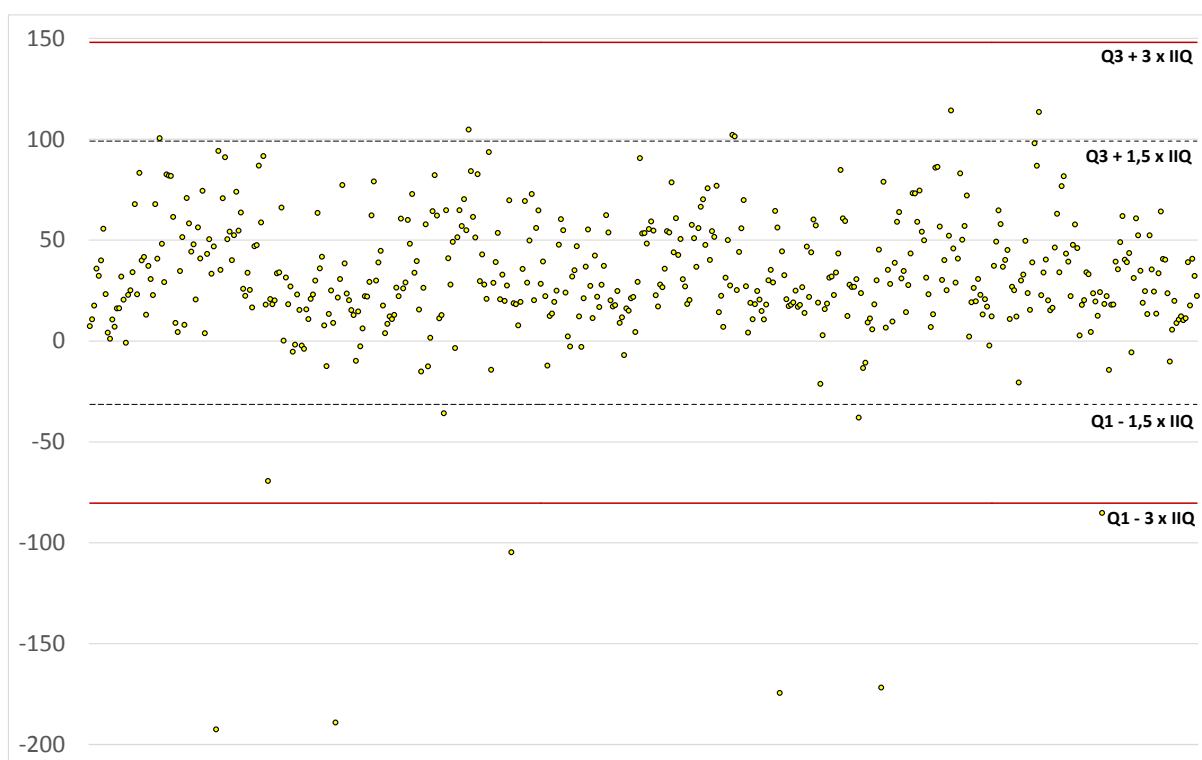


**Figura 11**– Desenho esquemático do ADV utilizado.

O medidor ADV permite a medição instantânea da velocidade de escoamento nas três direções (x, y e z). Os componentes da sonda ADV são apresentados na Figura 11. Ele é composto por um transmissor e dois ou três receptores acústicos para sondas 3D. Durante o processo de medição, a sonda ADV é orientada por meio de trilhos, que se encontram posicionados a cada 5 cm na direção longitudinal (x) e transversal (y). Os pontos de realização de medidas variaram de 02 a 10 no eixo longitudinal e 02 e 08 no eixo transversal. Com isso, são realizadas 63 medidas no plano. A representação dos pontos será dada como ponto 2-4 (2 na direção x e 4 na direção y). As medidas foram realizadas em um plano na metade da altura da lâmina de água.

A cada ponto foram coletados 500 medidas de velocidades instantâneas, nas três direções, e em seguida é feita a análise da velocidade média e do desvio padrão de velocidades nas direções x (longitudinal) e y (transversal ao canal). A escolha dessas duas componentes se justifica pela importância, das mesmas, dentro desse tipo de escoamento quando comparado a componente vertical (z).

É comum existir um ruído nestes tipos de medição realizadas com o ADV, e por isso, para todos os pontos de medição de velocidade, este ruído foi retirado desconsiderando todos os valores acima do valor do terceiro quartil (Q3) somado a 3 vezes o intervalo interquartil (IIQ ou Q3-Q1), e todos os valores abaixo do primeiro quartil (Q1) diminuído 3 vezes o intervalo interquartil (IIQ). Este é um procedimento comum pra a seleção e exclusão dos *outliers* de uma série de dados experimentais. É mais comum o uso do multiplicado de 1,5 vezes o intervalo de interquartil (IIQ) para esta abordagem, mas como o escoamento turbulento por si só apresenta uma variação brusca nas velocidades instantâneas, o multiplicador de 3 vezes o intervalo interquartil (IIQ) se apresentou bem aos valores medidos conforme pode ser verificado na Figura 12.



**Figura 12**– Exemplo da Seleção dos *Outliers* em um dos Pontos Levantados.

Os valores obtidos, de velocidade média e desvio padrão, são exportados para uma planilha eletrônica, que é utilizada para a geração dos mapas através do programa Matlab. O mapa de velocidades e dissipação de energia utilizam as velocidades médias obtidas e a dissipação de energia o desvio padrão (flutuação) da velocidade.

O canal utilizado nesse estudo representa um modelo reduzido parcial da escada do tipo ranhura vertical (TOMÉ, 2013). Para se converter para um protótipo, utiliza-se a correlação de

similaridade do número de Froude, onde se tem a relação entre as forças de inércia e gravitacional, que são as mais importantes em estudos em escoamentos com superfície livre.

Para tanto determina-se o fator de modelo reduzido  $\lambda$ , (Equação 14).

$$\lambda = \frac{L_p}{L_m} = \frac{3,00}{0,40} = 7,5 \quad (14)$$

Onde:

$L_p$  é a largura da escada de peixes do projeto,  $L_p = 3,00$  m;

$L_m$  é a largura da escada de peixes do modelo reduzido,  $L_m = 0,40$  m.

Para correlacionar a vazão utiliza-se o valor de  $\lambda$  calculado anteriormente. Essa correlação é obtida utilizando-se a relação de vazão de protótipo ( $Q_p$ ) e vazão do modelo reduzido ( $Q_m$ ) – Equação 15.

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \lambda^{5/2} \quad (15)$$

Como as vazões utilizadas nos testes foram de 35 m<sup>3</sup>/h, 40 m<sup>3</sup>/h, 45 m<sup>3</sup>/h, 50 m<sup>3</sup>/h e 55 m<sup>3</sup>/h, pela Equação 3 os valores correspondentes no protótipo são de 1,50 m<sup>3</sup>/s, 1,71 m<sup>3</sup>/s, 1,92 m<sup>3</sup>/s, 2,14 m<sup>3</sup>/s a 2,35 m<sup>3</sup>/s. Este tipo de MTP tem declividades usuais entre 5% e 12%. Desta forma escolheu-se abordar a variação nessa faixa. Para isso, os testes foram realizados nas declividades de 6%, 8%, 10% e 12%. Essas vazões são usuais de projeto de MTP, desse tipo, segundo equações de Rajaratnan (1986).

Para a determinação da tensão cisalhante de Reynolds surge um questionamento sobre como encontrar a flutuação da velocidade para o cálculo do parâmetro. Segundo Viana et. al. (no prelo) para se determinar o parâmetro representativo local deve-se proceder calculando a tensão com os valores de flutuação de velocidades instantâneos e depois determinar a média dos valores encontrados. No entanto, Duarte (2014) et. al. e Silva et. al. (2011) utilizaram a relação entre os as flutuações de velocidades máximas para a determinação do parâmetro. Desta forma, trabalharam-se os resultados para uma comparação entre as duas formas de determinação. Em seguida, levantou-se a flutuação média e o cálculo da tensão cisalhante de Reynolds foi

encontrada utilizando esse parâmetro. O objetivo dessas três formas de cálculo é verificar em qual situação a representatividade da determinação do parâmetro se mostra mais coerente.

No programa do Matlab foram utilizados os valores de protótipo para a geração dos mapas de velocidades, dissipação de energia e tensão cisalhante de Reynolds. Os valores serão também comparados com o levantamento de campo realizado por Viana (2005), realizado na UHE de Igarapava, pois, como sabe-se, varias espécies conseguem transpor esse sistema. Apesar da escada de Igarapava possuir configuração pouco diferente, com 3 m de largura e comprimento de tanque diferente, a vazão onde foi realizado os testes foi de  $1,21 \text{ m}^3/\text{s}$ , próximo ao menor valor testado nesse trabalho. A declividade do MTP da UHE de Igarapava é de 6%. A configuração do tanque do MTP da UHE de Igarapava é descrito na Figura 13.



**Figura 13** – Tanques do MTP da UHE de Igarapava  
Fonte: Viana 2005.

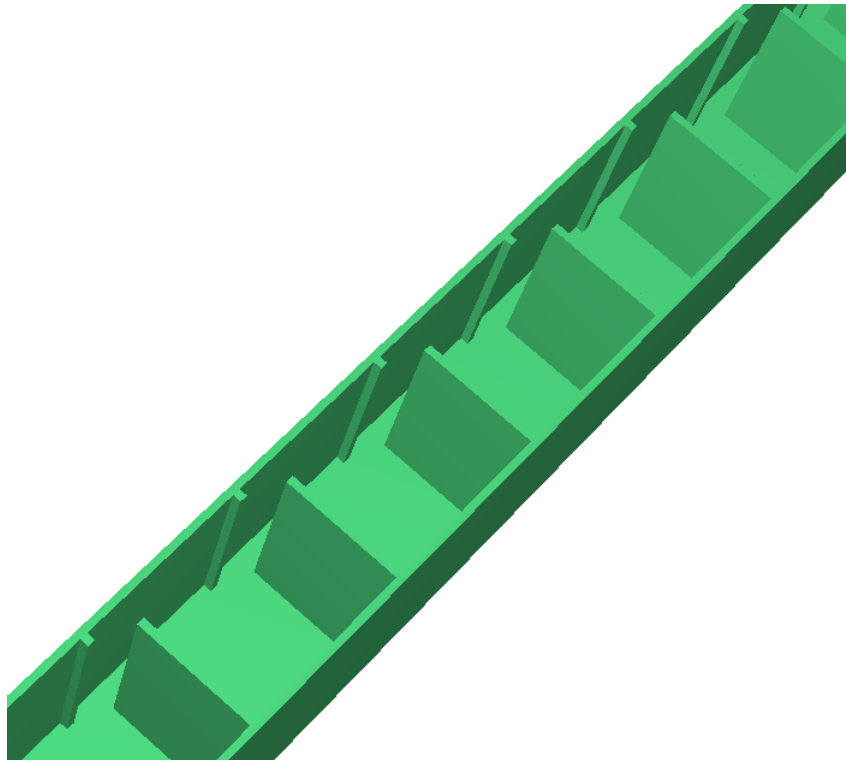
#### **4.2 Simulação computacional**

A simulação numérica através do Flow3D foi realizada buscando representar o mais fielmente possível ao experimento laboratorial, sendo portanto fisicamente representado pelas mesmas dimensões físicas descritas na metodologia laboratorial.

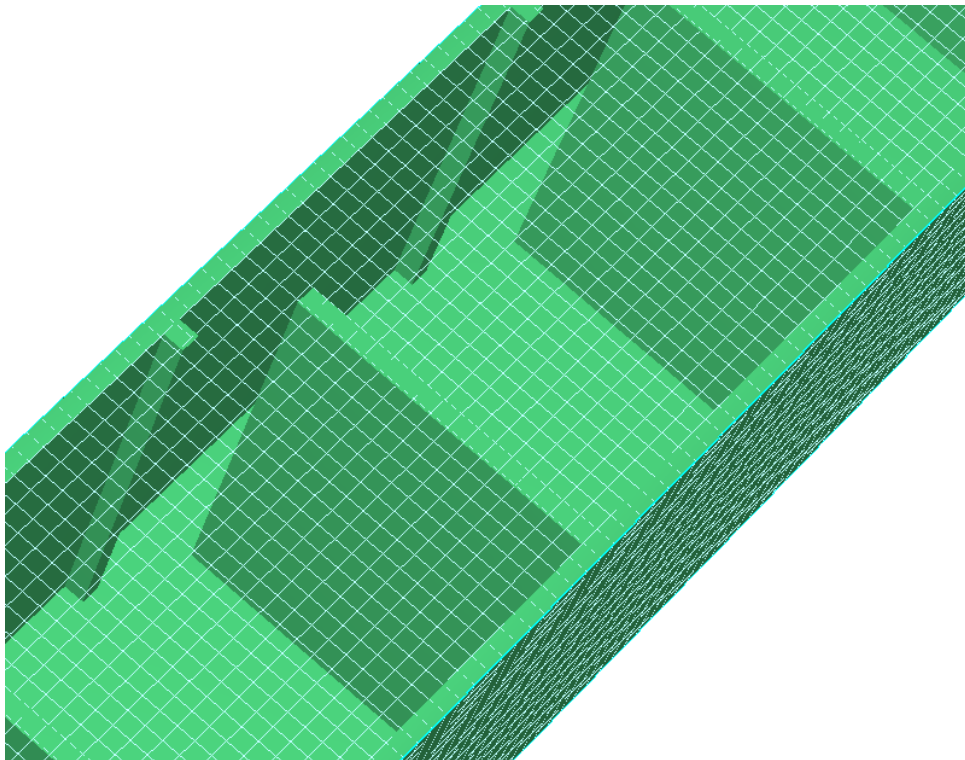
A Figura 14 apresenta o modelo tridimensional utilizado como base física para representação do canal e dos slots verticais, para este sólido foi estimado um coeficiente de rugosidade de Manning geral com base nos materiais de fundo, metal; de parede, vidro; e de slots, madeira envernizada no valor de 0,010 e que foi devidamente transformada de acordo com o tipo de unidade requerida pelo software.

A Figura 15 representa a malha escolhida para as simulações, é uma malha cartesiana e regular com cada elemento cúbico de 2cm de lado, totalizando 171.600 elementos. Com tal malha foi possível realizar as modelagens numéricas em um tempo hábil e com representabilidade suficiente para as análises aqui pretendidas.

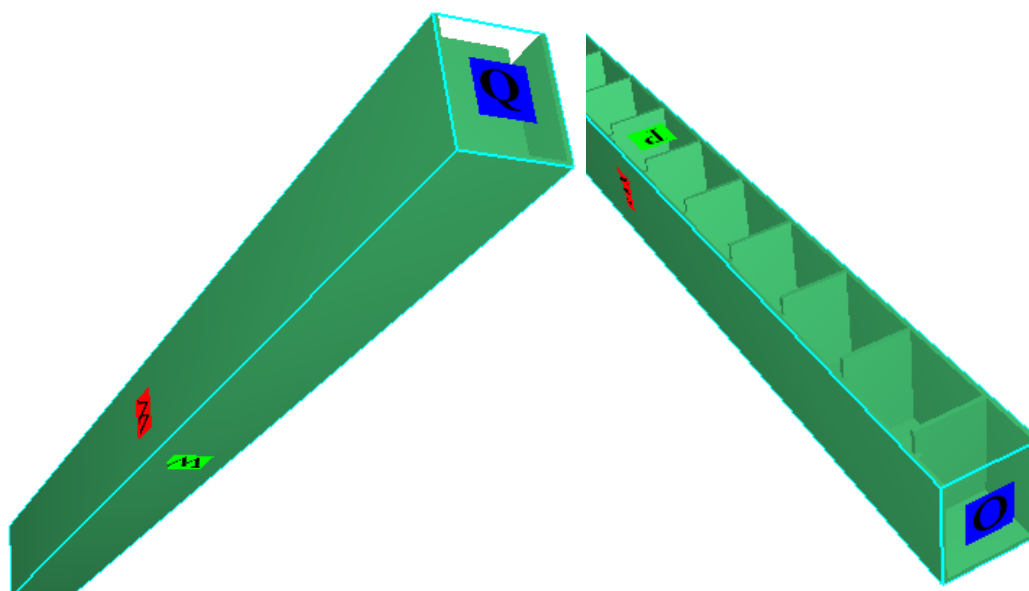
As condições de contorno são as características que devem ser consideradas numericamente nos limites extremos do que se pretende simular, no caso cada um destes limites foram determinados em planos e foram determinados da seguinte maneira: mais a montante do canal foi determinado uma vazão de entrada, o plano representado pela letra Q; mais a jusante foi considerada a saída do sistema, ou *output*, o plano representado pela letra O; para as paredes laterais e o fundo do canal foram considerados sem qualquer tipo de interação com o sistema, portanto estes os planos foram considerados como parede, ou *wall*, sendo os planos representados pela letra W; para a parte superior do canal, foi considerado a influência da pressão hidrostática, o plano representado por P. Estas condições de contorno podem ser verificadas na Figura 16.



**Figura 14** – Modelo Tridimensional Utilizado como Base Física para Representação do Canal e dos Slots Verticais.



**Figura 15** – Representação da Malha Escolhida para as Simulações Numéricas.

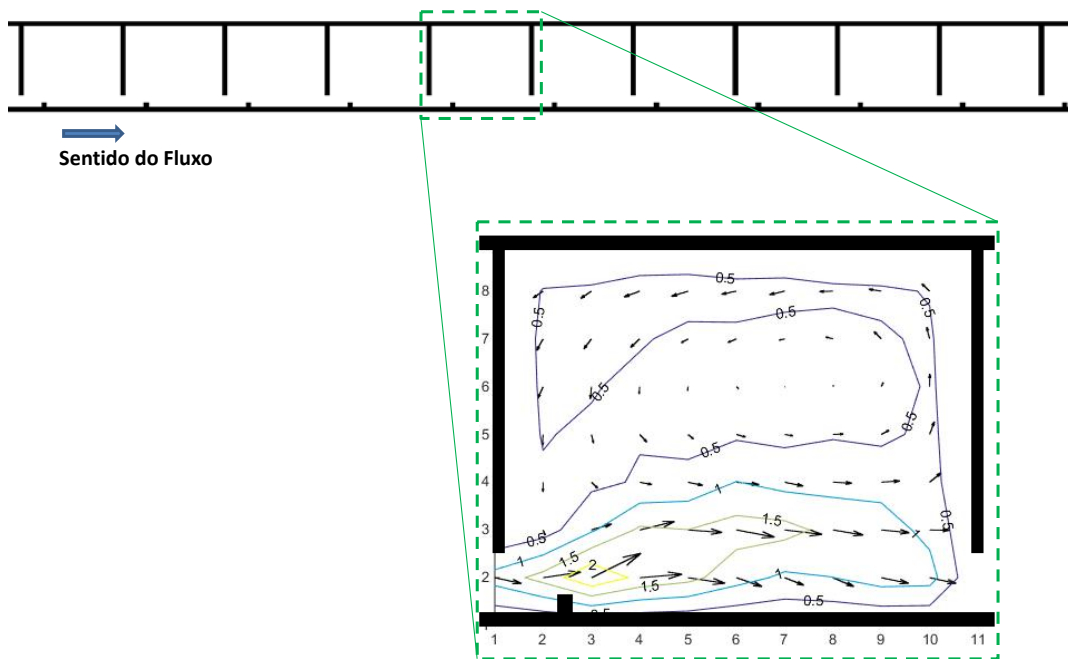


**Figura 16** – Condições de Contorno Escolhidas para as Simulações Numéricas.

O método escolhido para validação dos resultados foi o de comparação qualitativa das linhas de fluxo do modelo matemático com as setas direcionais de velocidade representado nos mapas de resultados experimentais. Este é um método simples, porém já representa um resultado importante para as análises pretendidas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados experimentais seguiram uma representação em plano conforme pode ser verificado na Figura 17. Serão apresentados os resultados para as declividades de 6, 8, 10 e 12% e para cada uma das declividades as vazões de 1,50 m<sup>3</sup>/s; 1,71 m<sup>3</sup>/s; 1,92 m<sup>3</sup>/s; 2,14 m<sup>3</sup>/s e 2,35 m<sup>3</sup>/s na escala de protótipo.



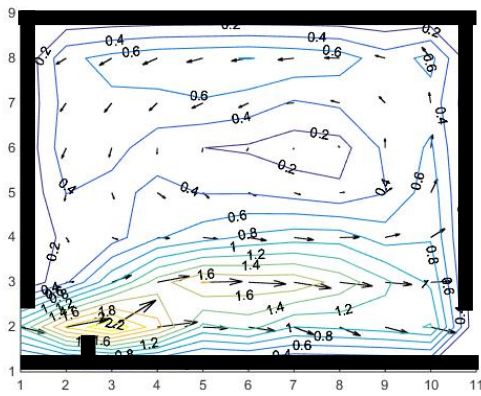
**Figura 17** – Representação esquemática do campo de velocidades no tanque da escada de peixes.

### 5.1 Campo de velocidades dentro do tanque

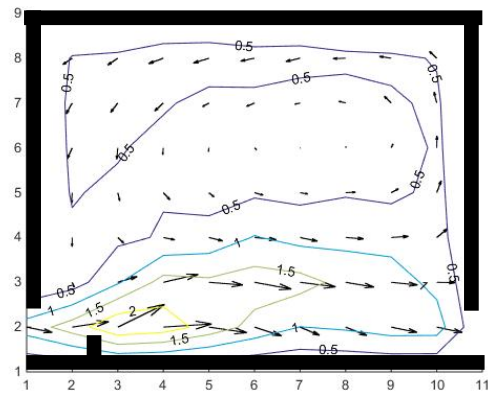
Como Santos *et. al.* (2012) levantaram a capacidade natatória de três espécies. Este trabalho adota como região restritiva a velocidade superior a 1,3 m/s, pois, corresponde à velocidade crítica de primeira maturação da espécie que possui menor capacidade de nado das observadas pelo referido autor.

A Figura 18 apresenta os resultados dos campos de velocidades para as cinco vazões e declividade de 6%.

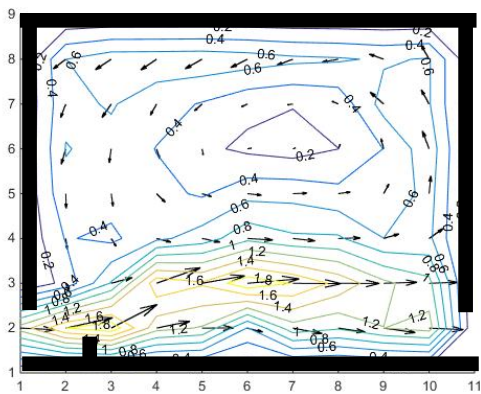
Para todas as vazões de 6% é possível perceber um fluxo principal próximo a parede direita, onde se encontra o menor dos anteparos verticais, e um fluxo secundário formando um vórtice característico com seu epicentro entre este fluxo principal e a parede esquerda do canal.



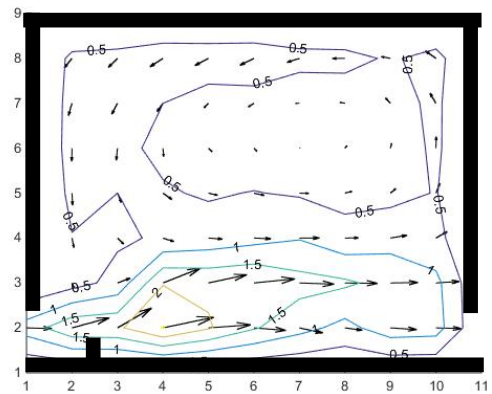
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



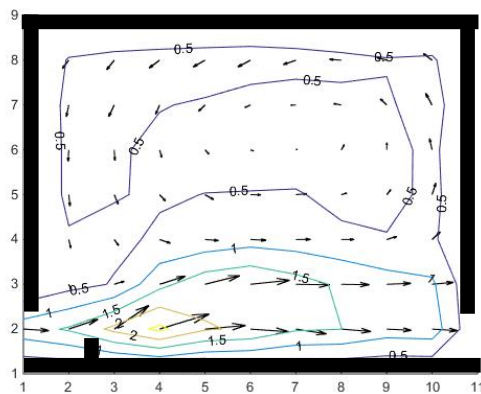
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s



(d) 2,14m<sup>3</sup>/s

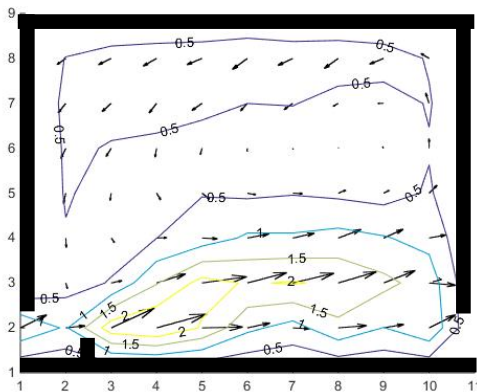


(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

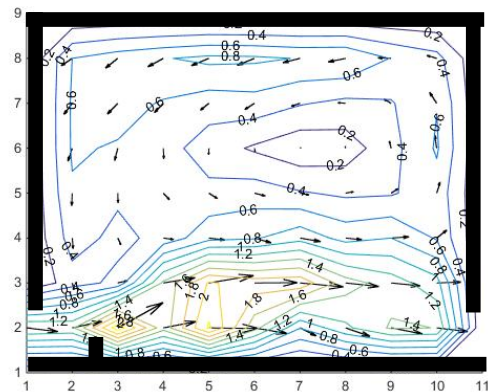
**Figura 18** – Representação dos resultados do campo de velocidades para a declividade de 6% (valores em m/s).

Na Figura 18, é possível verificar que as áreas no tanque que apresentam velocidades acima de 1,30 m/s estão concentradas na região de escoamento principal, fornecendo para qualquer uma das vazões regiões resultantes para os peixes realizarem a travessia, mesmo que seja possível verificar uma diminuição pouco considerável dessa área com o aumento da vazão.

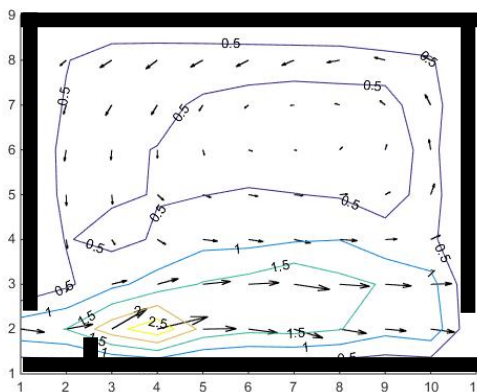
Para a declividade de 8 % os resultados dos campos de velocidades para as cinco vazões se encontra na Figura 19.



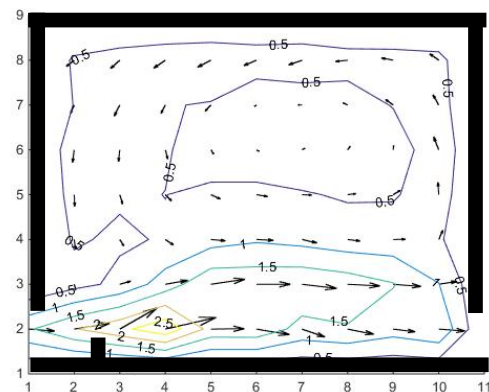
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



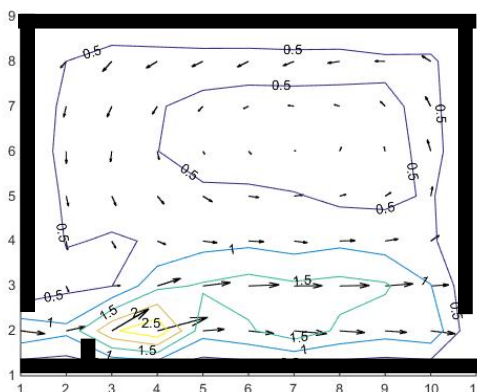
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s



(d) 2,14m<sup>3</sup>/s

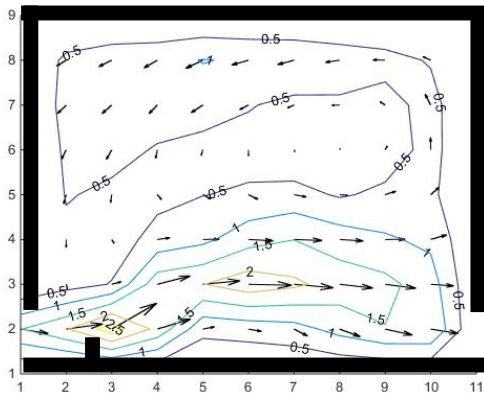


(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

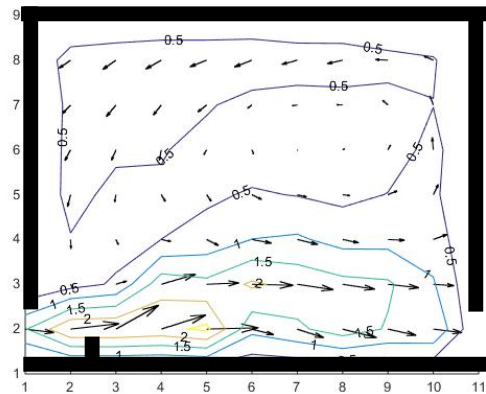
**Figura 19** – Representação dos resultados do campo de velocidades para a declividade de 8% (valores em m/s).

Para todas as vazões de 8% é possível perceber que o escoamento é similar ao observado na declividade de 6%. Além disso, inclusive na comparação na diminuição pouco considerável da área possível de passagem com o aumento da vazão.

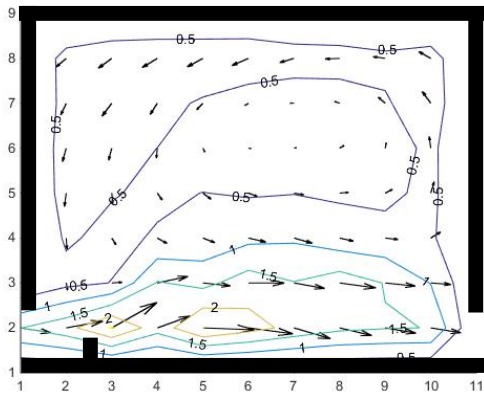
A Figura 20 apresenta os resultados no levantamento do campo de velocidades para as cinco vazões na declividade de 10%.



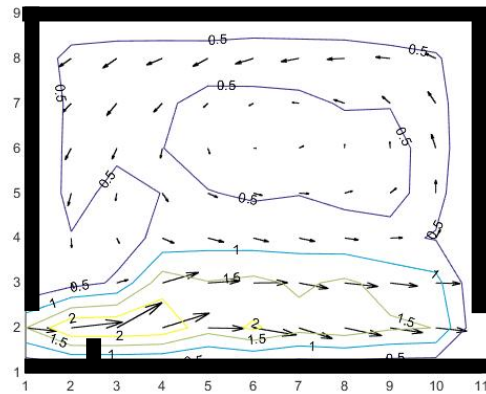
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



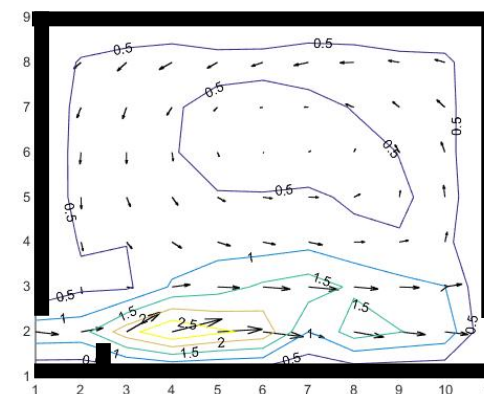
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s



(d) 2,14m<sup>3</sup>/s

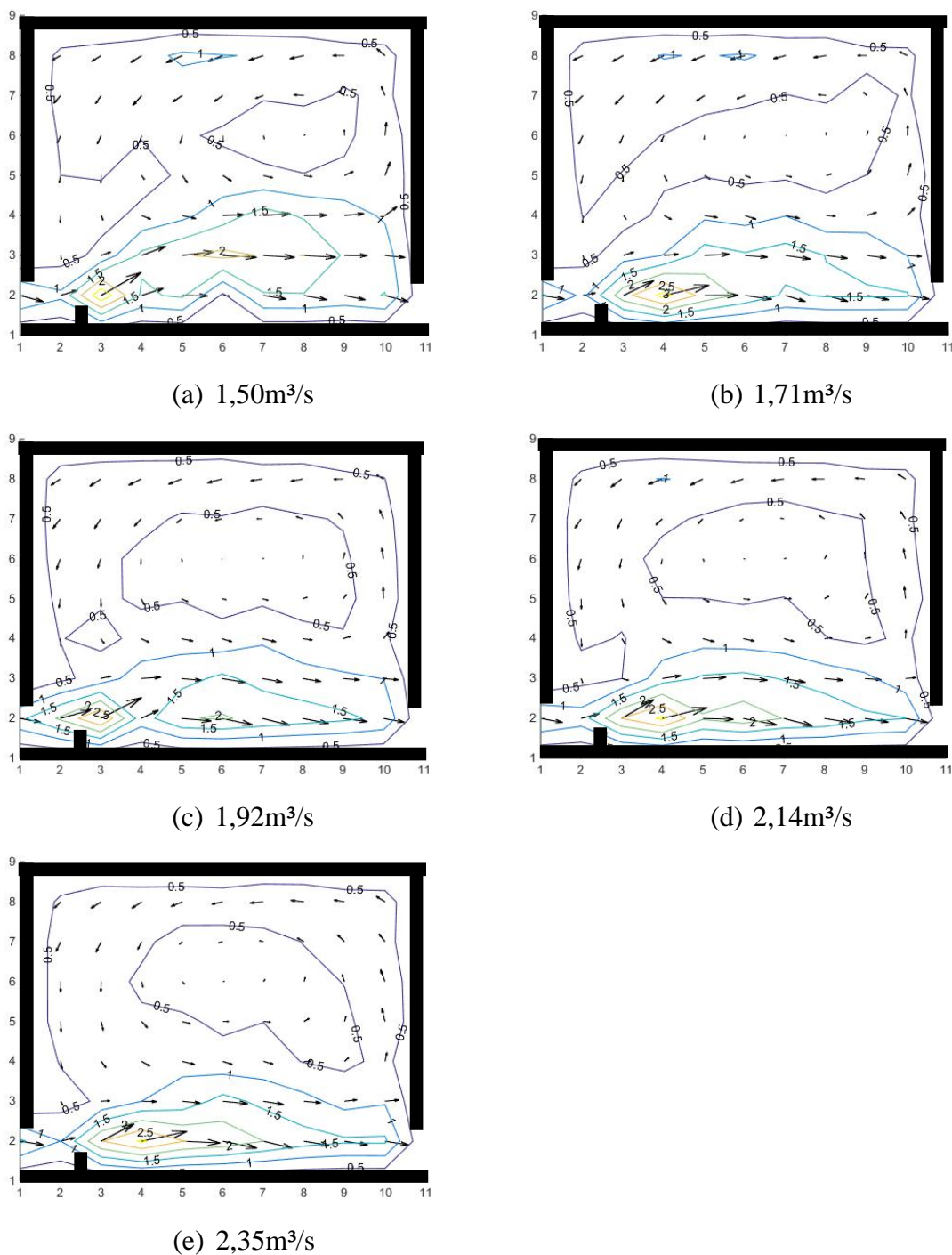


(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

**Figura 20** – Representação dos resultados do campo de velocidades para a declividade de 10% (valores em m/s).

O mesmo comportamento de escoamento é observado na declividade de 10% não sendo observadas grandes variações no campo de velocidades, nem na diminuição de áreas possíveis de passagem de peixes em que a velocidade deve ser inferior a 1,30 m/s.

O resultado do mapeamento da declividade de 12 % nas cinco vazões pode ser observado na Figura 21.

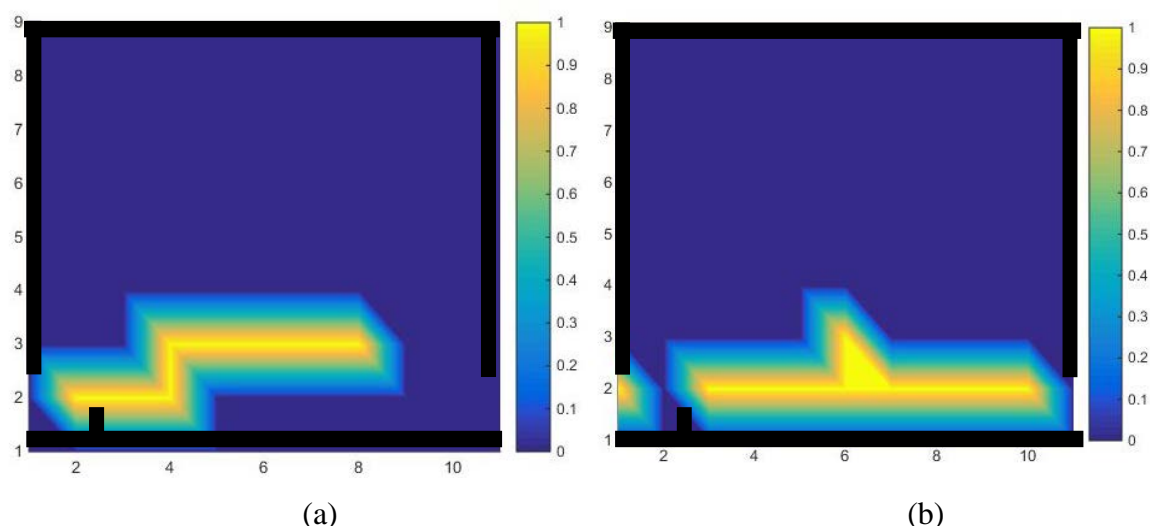


**Figura 21** – Representação dos resultados do campo de velocidades para a declividade de 12% (valores em m/s).

Com a declividade de 12 % não há alteração do comportamento do escoamento dentro do tanque. Assim, observa-se que a variação de vazão e declividade não promoveriam a limitação de passagem de peixes dentro dos tanques, visto que em todas as condições testadas ocorrem grandes áreas que permitiriam a passagens dos peixes.

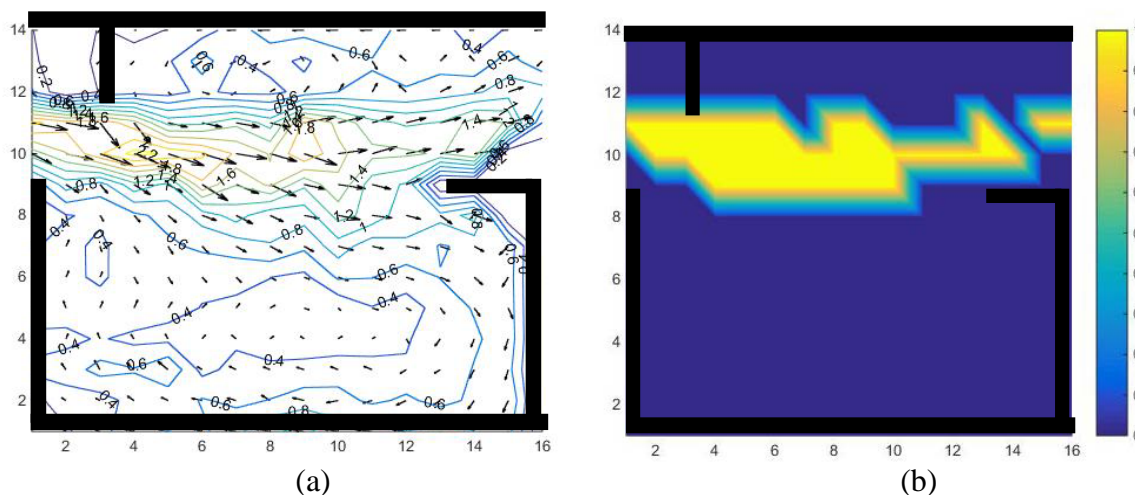
Pelos resultados das análises efetuadas, decidiu-se realizar um aprofundamento com relação às regiões de descanso e zonas de transição de cada um dos tanques. As regiões de descanso são as áreas dos tanques que exigem menos dos peixes e portanto permitem que os peixes possam renovar as energias para a próxima transição, representa a região na qual não possui o fluxo principal. As zonas de transição se encontram no resto dos tanques, nas quais os peixes são mais exigidos, essa combinação se assemelha com condições observadas na natureza. Em seguida portanto são feitas análises em termos de áreas nos tanques.

Fazendo a comparação das reduções de área possível de passagem dos peixes, considerando a velocidade limite de 1,30 m/s, para a menor declividade e vazão em comparação com o maior valor dos dois parâmetros chega-se ao resultado apresentado na Figura 22 (a) e (b).



**Figura 22** – Representação dos resultados área com velocidade inferior a 1,3 m/s para a (a) declividade de 6% e vazão de 1,5 m<sup>3</sup>/s e (b) declividade de 12% e vazão de 2,35 m<sup>3</sup>/s

Pela análise da Figura 22 pode-se observar que a variação da vazão e declividade não promove grandes reduções na parcela do tanque onde os peixes conseguiriam vencer o escoamento. Com o intuito comparativo como um sistema implantado, foi utilizado o resultado encontrado por Viana (2005) na escada de peixes da UHE de Igarapava. A Figura 23 mostra o resultado encontrada no mapeamento do tanque do MTP da UHE de Igarapava (a) e as regiões com valores de velocidade média inferior a 1,3 m/s.



**Figura 23** – Representação dos resultados do MTP de Igarapava para (a) campo de velocidades e (b) regiões com velocidade menor que 1,3 m/s.

Na comparação com resultados de campo encontrados no MTP da UHE de Igarapava com aqueles observados no modelo reduzido tem-se que os resultados são próximos tanto nos valores de velocidade na região de escoamento principal como quanto a área com valores inferiores ao valor de 1,3 m/s.

## 5.2 Campo de dissipação de energia dentro do tanque

Calculando a dissipação de energia utilizando a equação (7) de Bell (1973) para a vazão que escoava no MTP para essa configuração de tanque chega-se aos resultados apresentados na Tabela 2.

O valor de  $\Delta h$  foi definido considerando um escoamento uniforme para um tanque com a declividade e comprimento conhecidos. Na análise da tabela pode-se observar que os valores limite admissível de dissipação de energia ( $191 \text{ W/m}^3$ ) não é superado somente para as três menores vazões testadas.

Mas, além disso, foram utilizadas as velocidades locais encontradas para a geração dos mapas de dissipação de energia local com o intuito de verificar a influência desse parâmetro em cada região em função da declividade e vazão. As regiões consideradas como limites para a passagem dos peixes foram definidas como aquelas com dissipação de energia superior a  $191 \text{ W/m}^3$ , como levantado por Bell (1973). A Figura 24 apresenta os resultados para a declividade de 6% nas cinco vazões.

**Tabela 2** – Resultados para cada vazão e declividade da dissipação de energia usando a equação de Bell (1973).

S =6%  $\gamma=9810 \text{ N/m}^3$

Q modelo (m <sup>3</sup> /h)	Q modelo (m <sup>3</sup> /s)	Q protótipo (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>0</sub> (m)	L protótipo (m)	B protótipo (m)	Δh (m)	K (W/m <sup>3</sup> )
35,00	0,010	1,50	1,58	3,00	3,75	0,23	186,6
40,00	0,011	1,71	1,76	3,00	3,75	0,23	190,5
45,00	0,013	1,93	2,00	3,00	3,75	0,23	189,4
50,00	0,014	2,14	2,18	3,00	3,75	0,23	193,0
55,00	0,015	2,35	2,40	3,00	3,75	0,23	192,4

S =8%  $\gamma=9810 \text{ N/m}^3$

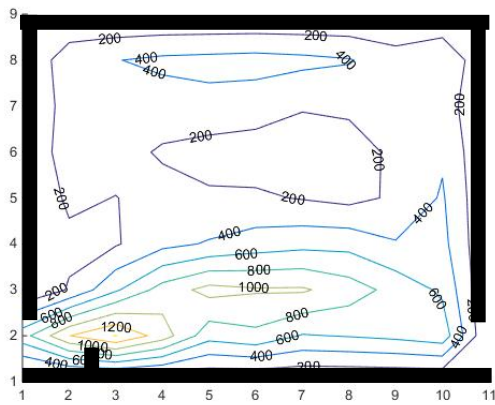
Q modelo (m <sup>3</sup> /h)	Q modelo (m <sup>3</sup> /s)	Q protótipo (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>0</sub> (m)	L protótipo (m)	B protótipo (m)	Δh (m)	K (W/m <sup>3</sup> )
35,00	0,010	1,50	1,43	3,00	3,75	0,30	274,9
40,00	0,011	1,71	1,58	3,00	3,75	0,30	284,3
45,00	0,013	1,93	1,80	3,00	3,75	0,30	279,9
50,00	0,014	2,14	2,03	3,00	3,75	0,30	276,4
55,00	0,015	2,35	2,25	3,00	3,75	0,30	273,6

S =10%  $\gamma=9810 \text{ N/m}^3$

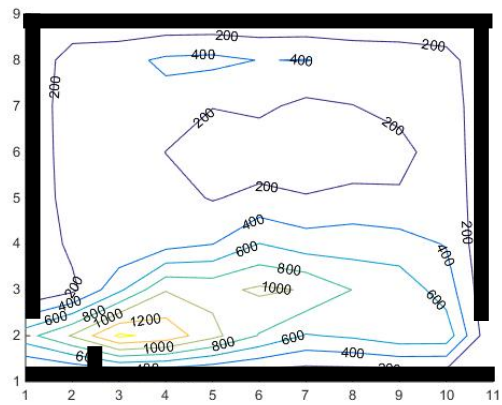
Q modelo (m <sup>3</sup> /h)	Q modelo (m <sup>3</sup> /s)	Q protótipo (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>0</sub> (m)	L protótipo (m)	B protótipo (m)	Δh (m)	K (W/m <sup>3</sup> )
35,00	0,010	1,50	1,28	3,00	3,75	0,38	384,1
40,00	0,011	1,71	1,50	3,00	3,75	0,38	373,1
45,00	0,013	1,93	1,73	3,00	3,75	0,38	365,0
50,00	0,014	2,14	1,95	3,00	3,75	0,38	358,8
55,00	0,015	2,35	2,03	3,00	3,75	0,38	380,0

S =12%  $\gamma=9810 \text{ N/m}^3$

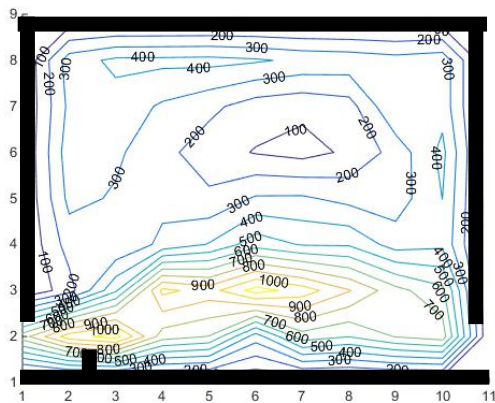
Q modelo (m <sup>3</sup> /h)	Q modelo (m <sup>3</sup> /s)	Q protótipo (m <sup>3</sup> /s)	y <sub>0</sub> (m)	L protótipo (m)	B protótipo (m)	Δh (m)	K (W/m <sup>3</sup> )
35,00	0,010	1,50	1,28	3,00	3,75	0,45	460,9
40,00	0,011	1,71	1,43	3,00	3,75	0,45	471,3
45,00	0,013	1,93	1,58	3,00	3,75	0,45	479,7
50,00	0,014	2,14	1,80	3,00	3,75	0,45	466,4
55,00	0,015	2,35	1,95	3,00	3,75	0,45	473,6



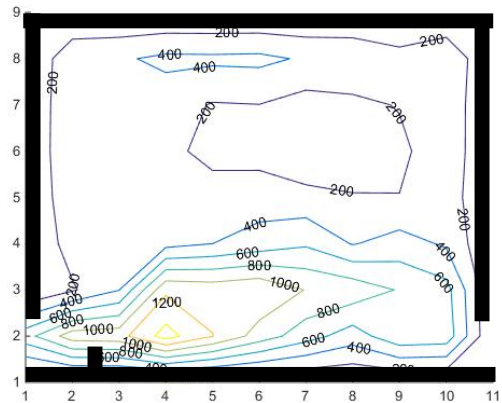
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



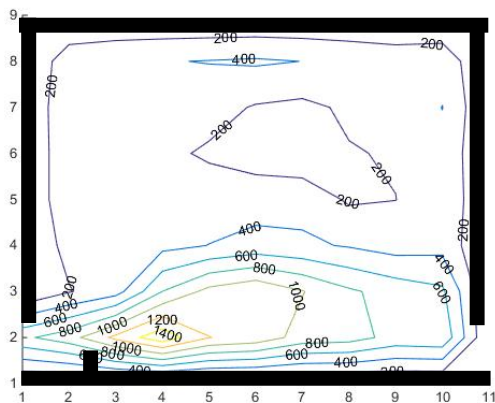
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s



(d) 2,14m<sup>3</sup>/s

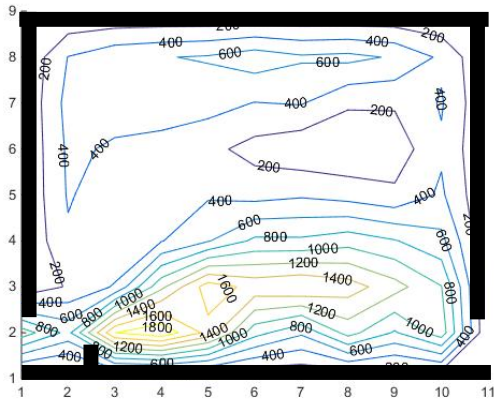


(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

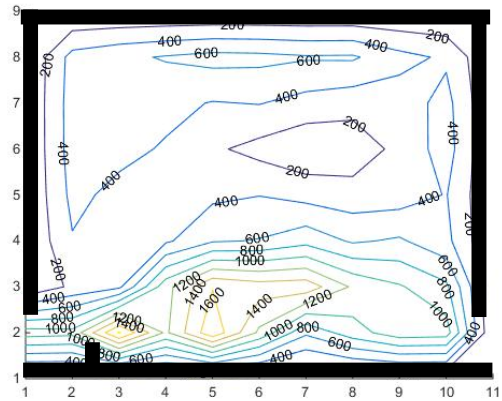
**Figura 24** – Representação dos resultados do campo de dissipação de energia para a declividade de 6% (valores em W/m<sup>3</sup>).

Pela figura 23 pode-se observar que a dissipação de energia tem valores maiores, podendo atingir 1.200 W/m<sup>3</sup>, na região do escoamento principal. No entanto, há regiões extensas em que os valores são menores ou igual a 191 W/m<sup>3</sup>, que permitiriam a passagem dos peixes.

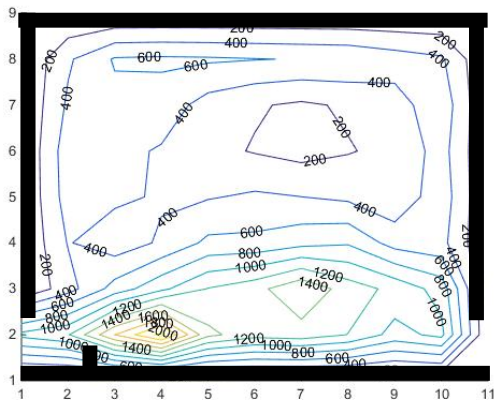
Pela Figura 25 pode-se observar o mapa de dissipação de energia para a declividade de 8% nas cinco vazões. Nessa declividade observa-se que a região com valores, iguais ou inferiores ao limite máximo, são restritos dentro do tanque. Desta forma, observa-se que as áreas por onde os peixes conseguiriam transpor seriam minimizadas. Essa redução de área poderá ser um fator crucial para a eficiência do sistema funcionando nessa condição.



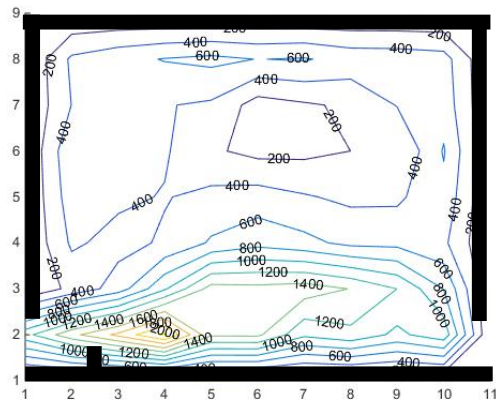
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



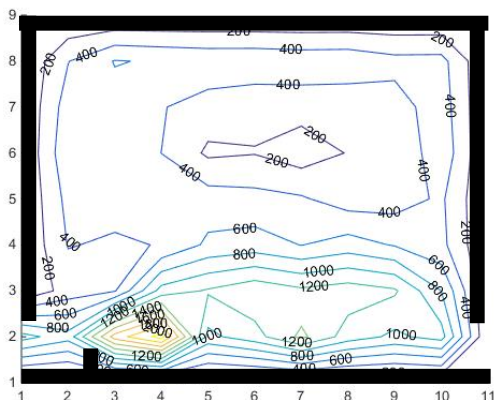
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s



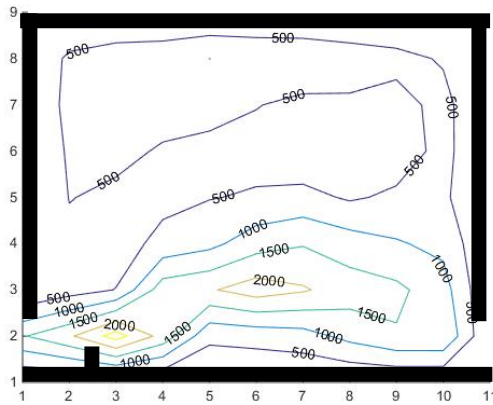
(d) 2,14m<sup>3</sup>/s



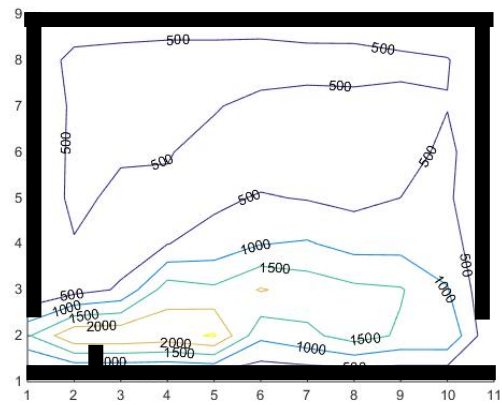
(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

**Figura 25** – Representação dos resultados do campo de dissipação de energia para a declividade de 8% (valores em W/m<sup>3</sup>).

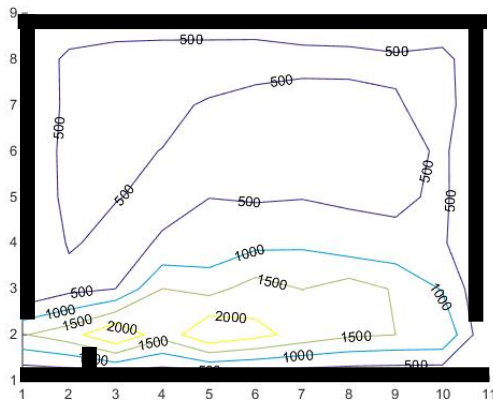
Os resultados de dissipação de energia para a declividade de 10% na cinco vazões podem ser observados na Figura 26.



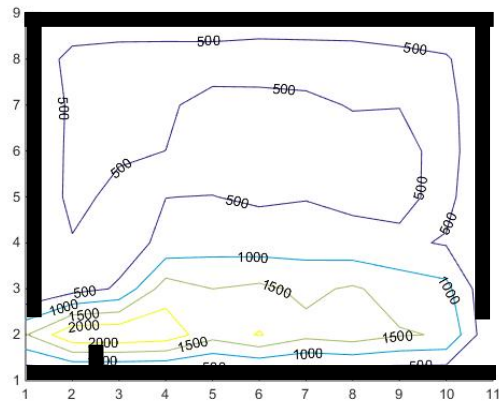
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



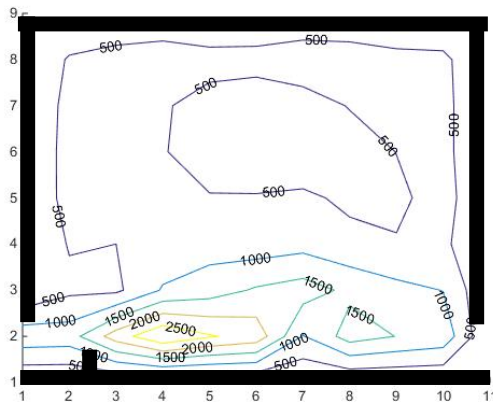
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s



(d) 2,14m<sup>3</sup>/s

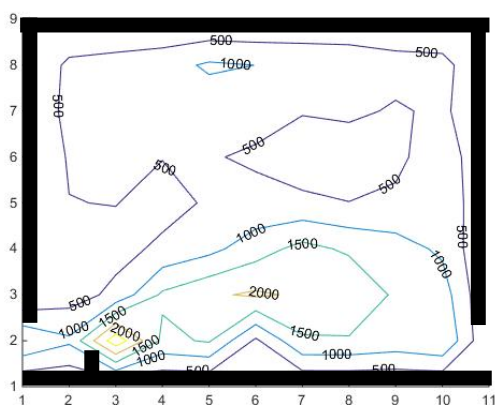


(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

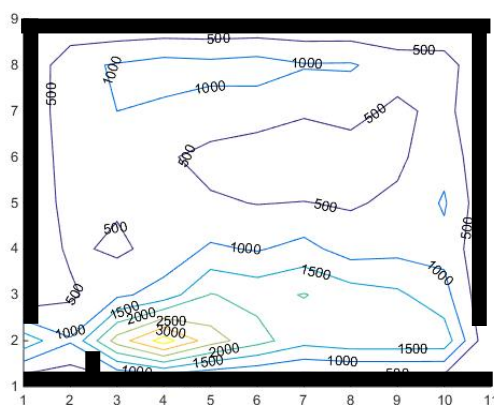
**Figura 26** – Representação dos resultados do campo de dissipação de energia para a declividade de 10% (valores em W/m<sup>3</sup>).

Os resultados conseguidos pelo mapeamento de dissipação de energia para a declividade de 10% mostra que a passagem de peixes nessa condição, para todas as vazões, seriam impossível, visto não ocorrer corredores com valores menores que o limite adotado.

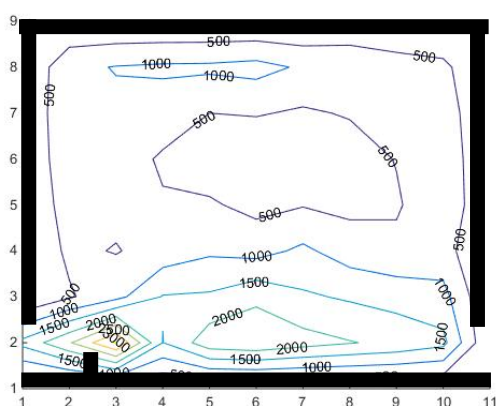
A Figura 27 mostra os resultados de campo de dissipação de energia para a declividade de 12%.



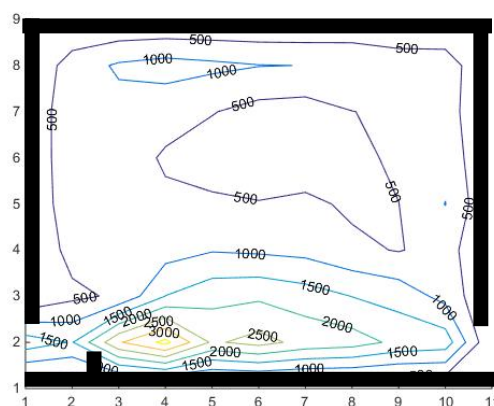
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



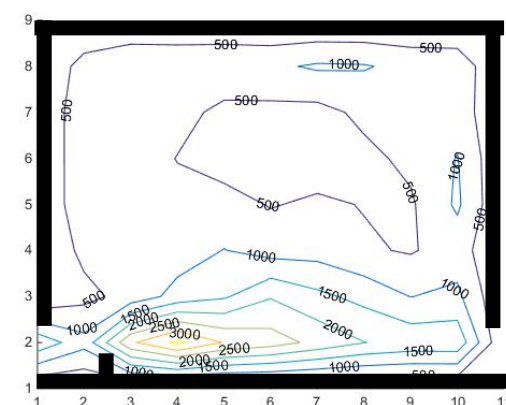
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s



(d) 2,14m<sup>3</sup>/s

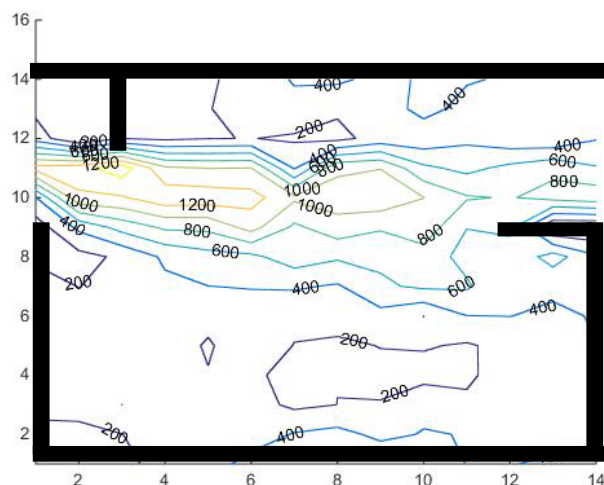


(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

**Figura 27** – Representação dos resultados do campo de velocidades para a declividade de 12% (valores em W/m<sup>3</sup>).

Com a declividade de 12% os valores mínimos encontrados dentro do tanque são de 500 W/m<sup>3</sup>, muito superiores ao limite definido como máximo. Deste modo, essa declividade se mostra totalmente inviável de utilização segundo o critério definido por Bell (1973).

Para efeito comparativo foi construído os valores de dissipação de energia dentro do tanque do MTP da UHE de Igarapava (Figura 28).

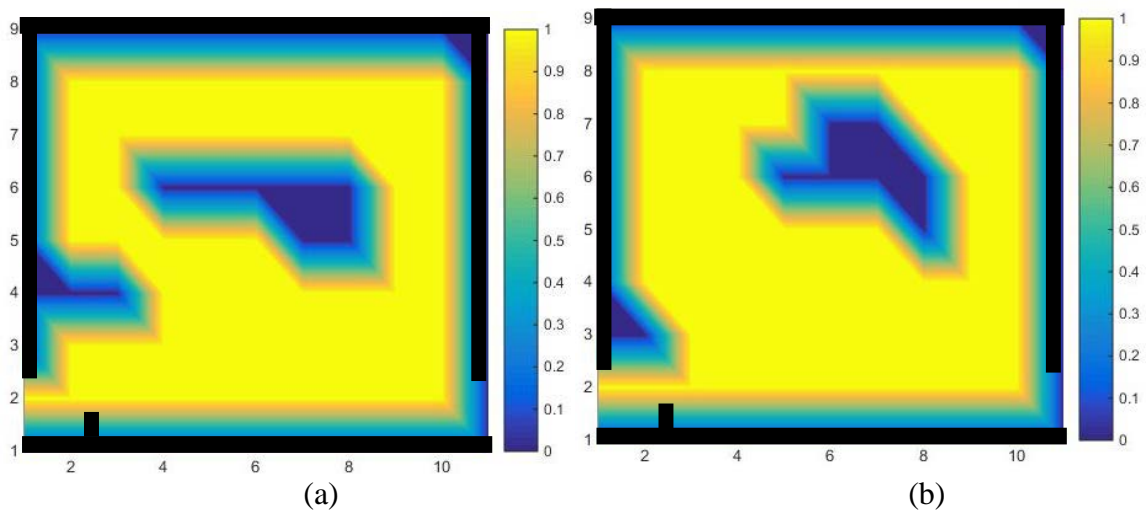


**Figura 28** – Representação do campo de dissipação de energia dentro do tanque do MTP da UHE de Igarapava (valores em  $W/m^3$ ).

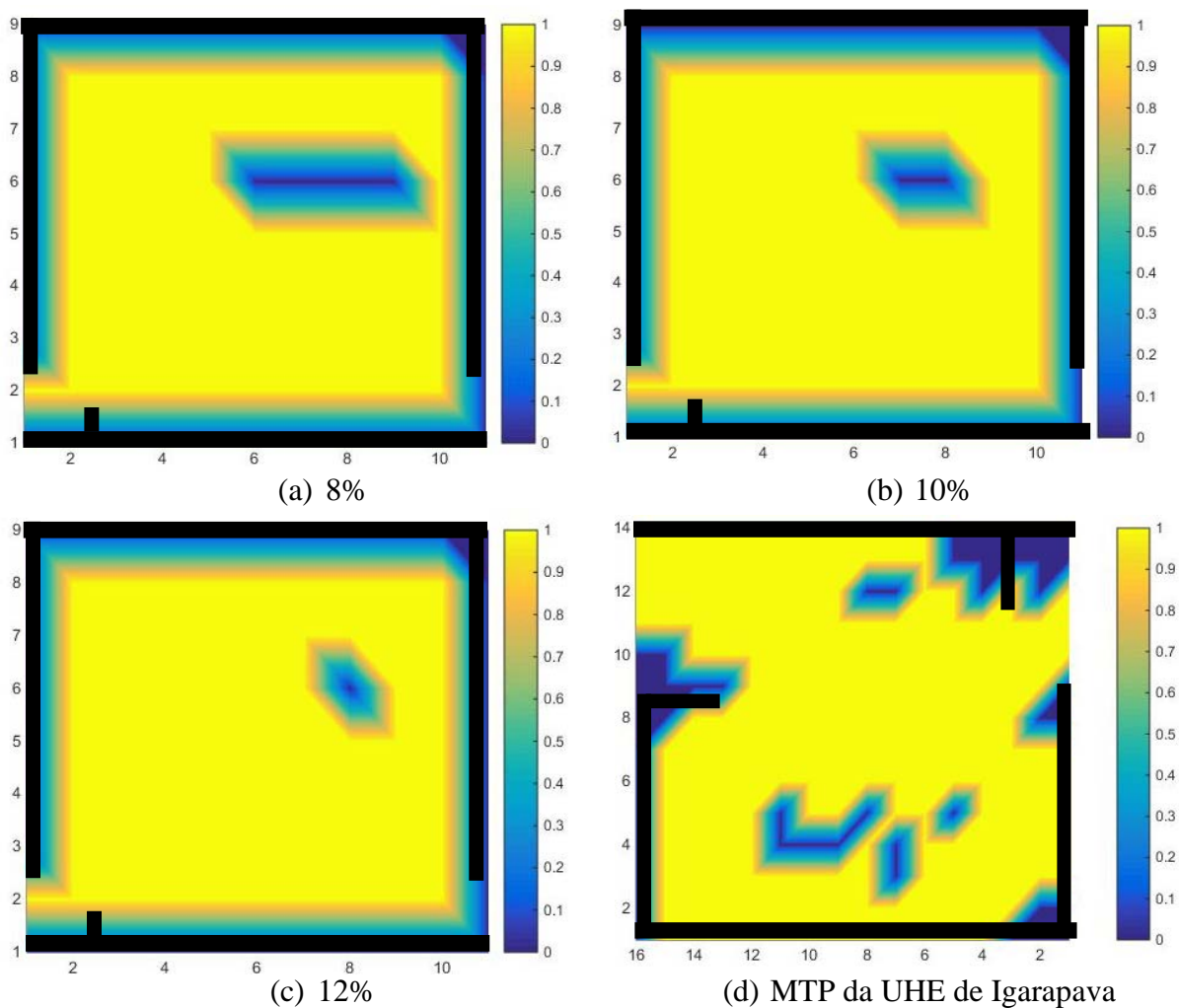
Aparentemente a variação da vazão não promove grandes alterações nas regiões com dissipação de energia limite para a passagem de peixes. No intuito comprovar essa observação a Figura 29 apresenta a comparação das áreas com regiões inferiores a  $191 W/m^3$  na declividade de 6% para a vazão mínima testada de  $1,50 m^3/s$  (a) e máxima de  $2,35 m^3/s$  (b). Nesses mapas a regiões com valores inferiores a  $191 W/m^3$  assumem valores iguais a zero e superiores igual a 1.

Como pode ser observado somente em alguns pontos próximos a parede e na região central a dissipação de energia é inferior a  $191 W/m^3$  nas duas vazões, mostrando, desta forma, que a vazão não promove grande influência na variação desse parâmetro.

Assim decidiu-se fazer a comparação dos mapas com a delimitação das áreas com valores inferiores ao definido como máximo para a passagem dos peixes,  $191 W/m^3$  para as outras declividades na vazão mínima ( $1,50 m^3/s$ ). Este valor foi definido com o intuito de comparar com os resultados desse parâmetro para o MTP da UHE de Igarapava (Figura 30)



**Figura 29** – Representação dos resultados das áreas com dissipação de energia inferior a  $191\text{W/m}^3$  nas vazões de  $1,50\text{ m}^3/\text{s}$  (a) e máxima de  $2,35\text{ m}^3/\text{s}$  (b) para declividade de 6%



**Figura 30** – Mapa de regiões com valores inferiores a  $191\text{ W/m}^3$  para as declividade de (a) 8%, (b) 10%,(c) 12%,(d) MTP da UHE de Igarapava ( $Q=1,5\text{m}^3/\text{s}$ ).

Na Figura 30 pode-se observar que a área com valores inferiores ao limite definido vai reduzindo até praticamente desaparecer. Quando comparado aos valores encontrados no MTP da UHE Igarapava tem-se valores muito próximos aos observados nos mapeamentos de dissipação de energia limites, com poucas regiões com valores inferiores a  $191 \text{ W/m}^3$ . Porém, como foi destacado anteriormente, várias espécies passam por este sistema funcionando com as características demonstradas. Desta forma, o levantamento da dissipação de energia local deverá ser analisado em comparação ao encontrado para as condições médias de funcionamento.

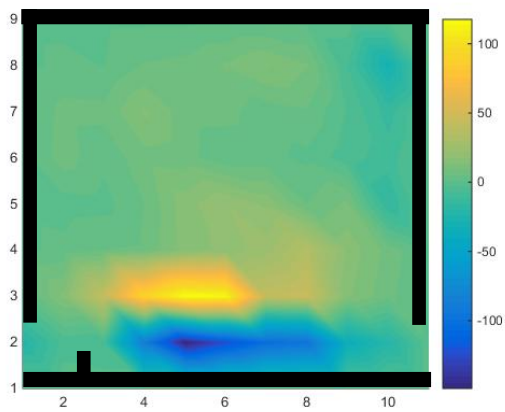
### **5.3 Campo de tensão cisalhante de Reynolds dentro do tanque**

Para o levantamento da tensão cisalhante de Reynolds utilizou-se a flutuação pontual das velocidades nas direções x (longitudinal) e y (transversal) dentro do canal, como realizado por Sanagioto (2007). Segundo Cada (1999), como descrito acima, a região onde os peixes conseguem passar sem danos é inferior a  $500 \text{ N/m}^2$ . Desta forma esse foi o valor adotado como limitante. Primeiramente será apresentado o levantamento de tensão considerando o cálculo com a flutuação instantânea e depois o cálculo da tensão média por ponto.

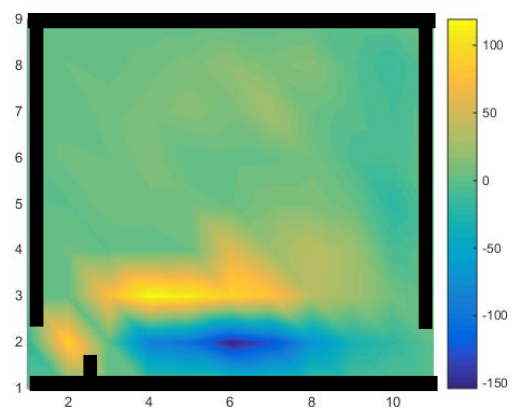
O resultado encontrado para essa condição na declividade de 6% pode ser verificada na Figura 31 e pode-se observar que a vazão não causa grandes alterações nos valores de tensão cisalhante de Reynolds dentro do tanque. Verifica-se somente um ligeiro aumento na região onde esse parâmetro é representativo, ficando limitado a região de escoamento principal, e com valores extremos sempre abaixo do limitante, de  $500 \text{ N/m}^2$ .

A Figura 32 apresenta os resultados de tensão cisalhante de Reynolds para 8% e pode-se observar o mapa de tensão cisalhante para a declividade de 8% nas cinco vazões. Nessa declividade observa-se que para todas as vazões os valores de tensão cisalhante estão abaixo do limite de  $500 \text{ N/m}^2$ , e ainda existe pouca variação da tensão entre as diferentes vazões, sendo observado apenas um aumento dos máximos e mínimos das tensões cisalhantes nos mapas.

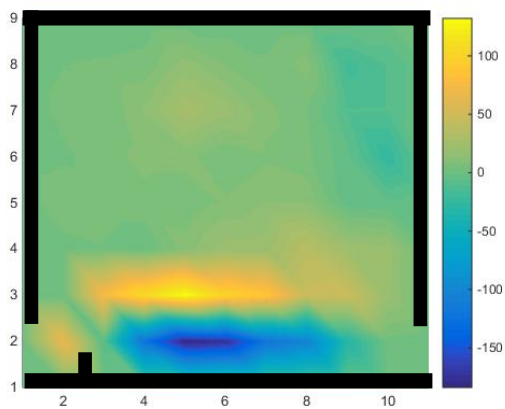
Pela Figura 33 pode-se observar o mapa de tensão cisalhante para a declividade de 10% nas cinco vazões. Nessa declividade observa-se que para todas as vazões os valores de tensão cisalhante estão abaixo do limite, e ainda existe pouca variação da tensão entre as diferentes vazões.



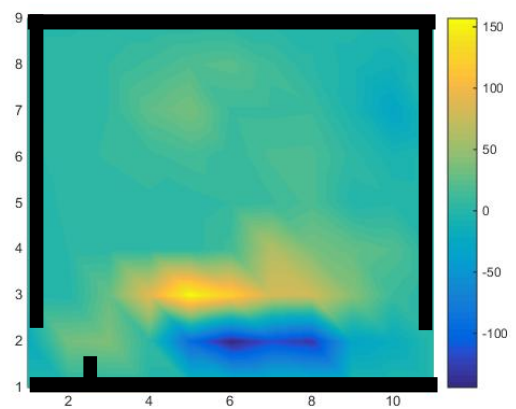
(a)  $1,50\text{m}^3/\text{s}$



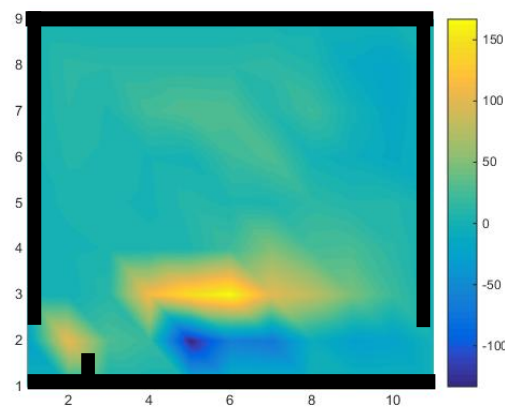
(b)  $1,71\text{m}^3/\text{s}$



(c)  $1,92\text{m}^3/\text{s}$

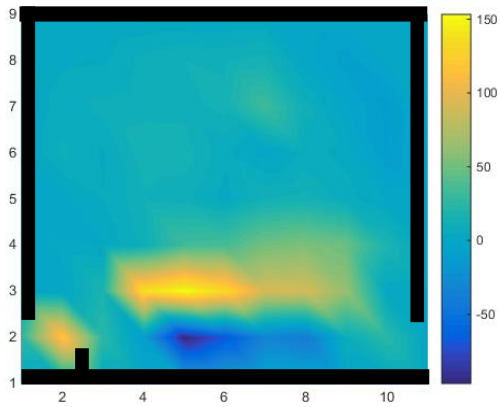


(d)  $2,14\text{m}^3/\text{s}$

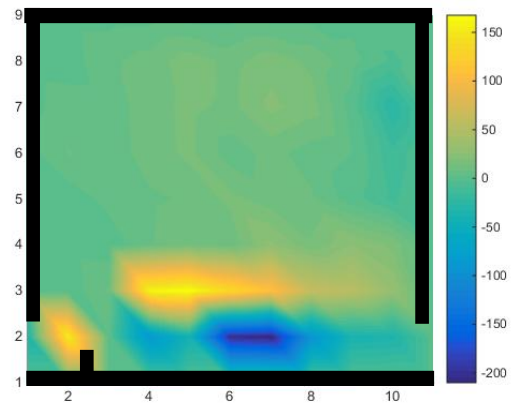


(e)  $2,35\text{m}^3/\text{s}$

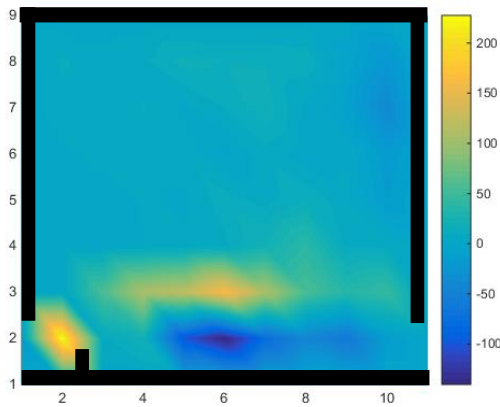
**Figura 31** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds para a declividade de 6% utilizando tensão média para cada flutuação instantânea (valores em  $\text{N}/\text{m}^2$ ).



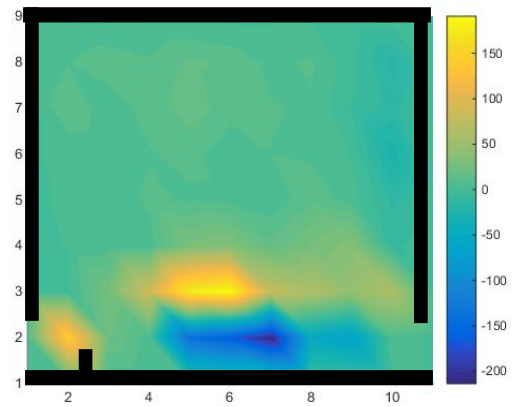
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



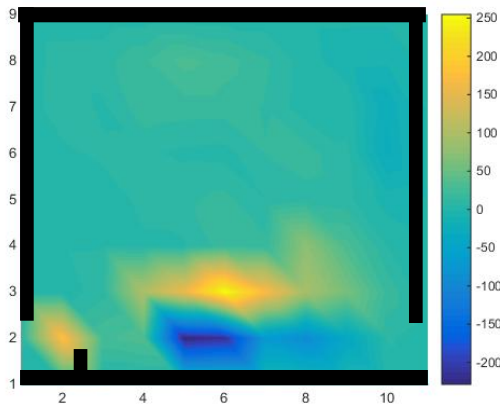
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s

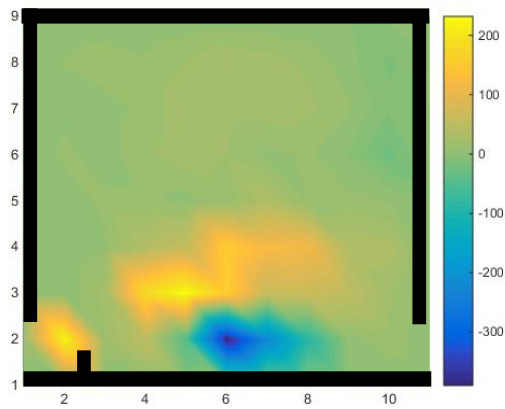


(d) 2,14m<sup>3</sup>/s

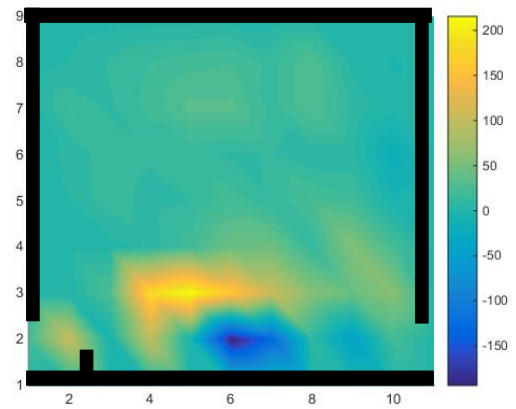


(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

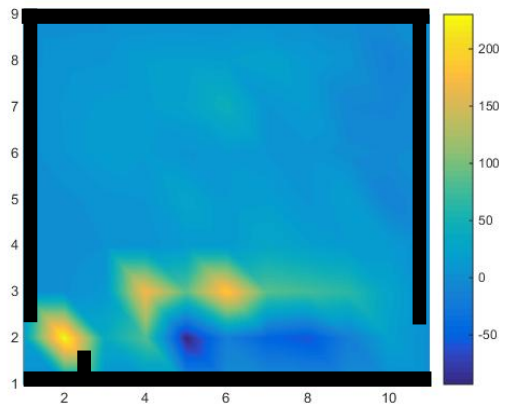
**Figura 32** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds para a declividade de 8% utilizando tensão média para cada flutuação instantânea (valores em N/m<sup>2</sup>).



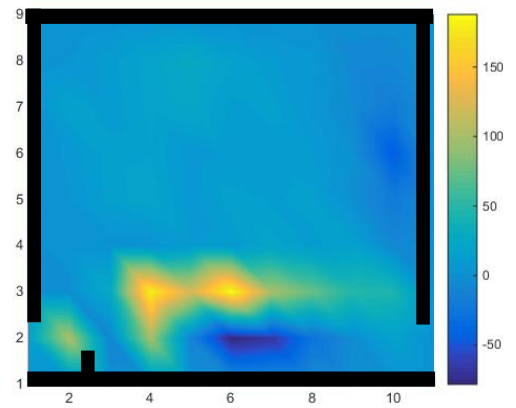
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



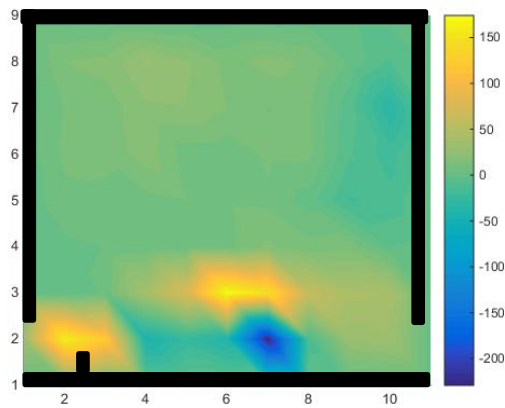
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s

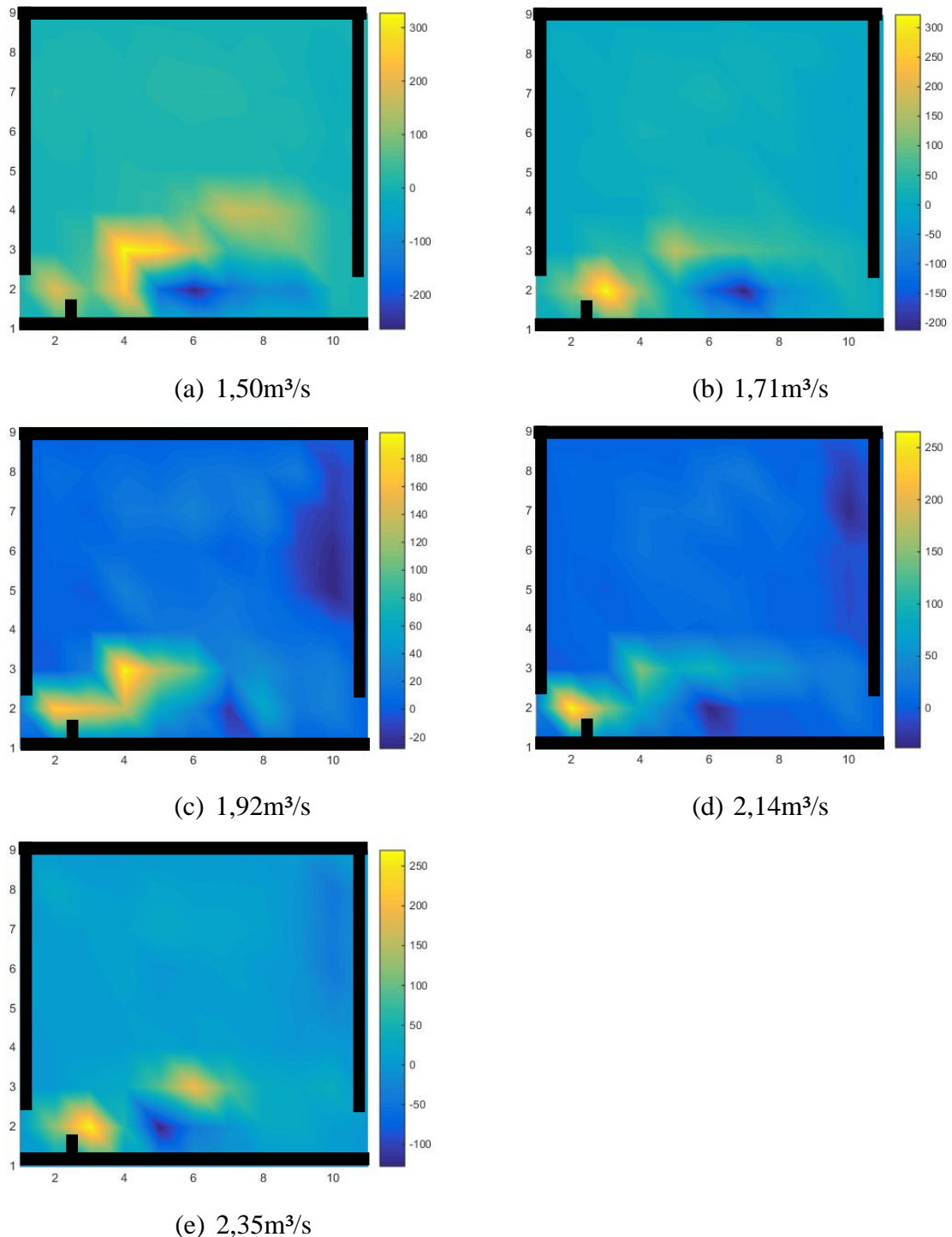


(d) 2,14m<sup>3</sup>/s



(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

**Figura 33** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds para a declividade de 10% utilizando tensão média para cada flutuação instantânea (valores em N/m<sup>2</sup>).



**Figura 34** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds para a declividade de 12% utilizando tensão média para cada flutuação instantânea (valores em N/m<sup>2</sup>).

Os resultados de tensão cisalhante de Reynolds para 12% podem ser vistos pela Figura 34. E a mesma observação para a declividade de 10% é verificada para a declividade de 12%, onde os valores possuem poucas alterações e mesmo para a maior vazão os valores continuam abaixo do limite máximo recomendado, de 500 N/m<sup>2</sup>. Em todos os casos observa-se que os valores de tensão cisalhante de Reynolds não supera o valor de 250 N/m<sup>2</sup>.

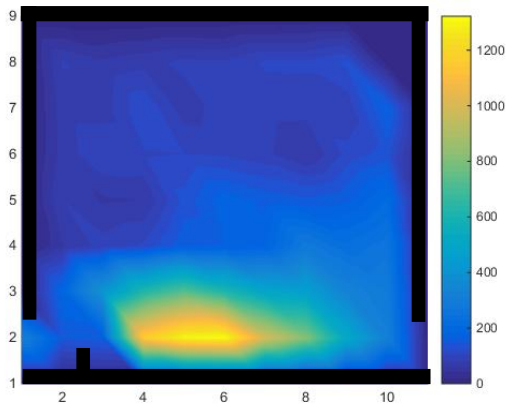
Em seguida foi gerado os mapas com os resultado considerando a flutuação máxima de velocidades nas direções x e y, seguindo o que foi realizado por Silva, *et. al.* (2011) e Duarte, *et. al.* (2014).

A Figura 35 mostra os resultados do mapa de tensão cisalhante de Reynolds máximo local para a declividade de 6%. E pode-se observar que a vazão não causa grandes alterações nos valores de tensão cisalhante de Reynolds dentro do tanque. Verifica-se somente um ligeiro aumento na região onde esse parâmetro é representativo, ficando limitado principalmente na região de escoamento principal. Para todos as vazões percebe-se que na região de escoamento principal os valores de tensão cisalhante de Reynolds chegam a valores acima de 1.000 N/m<sup>2</sup>, valores acima do limite máximo, mas nas outras áreas percebe-se valores abaixo do limite de 500 N/m<sup>2</sup>.

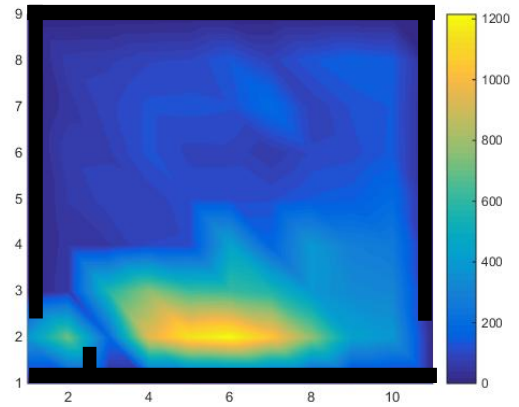
A mesma observação para a declividade de 6% é verificada para a declividade de 8% na Figura 36, onde os valores apresentam poucas alterações de valores e aumento de área com valores representativos de tensão de Reynolds. No entanto, percebe-se uma diminuição de área possível de travessia dos peixes de acordo com os limites estabelecidos de 500 N/m<sup>2</sup>, porém acredita-se que ainda seja possível a travessia dos peixes.

Pela Figura 37 pode ser observado os resultados de tensão cisalhante de Reynolds máxima para 10% e pode ser observado que os valores de tensão cisalhante de Reynolds aumentam na região de escoamento principal chegando a valores superiores a 2.000 N/m<sup>2</sup>, porém, a região onde estes valores são representativos continuam sendo limitados a essa região.

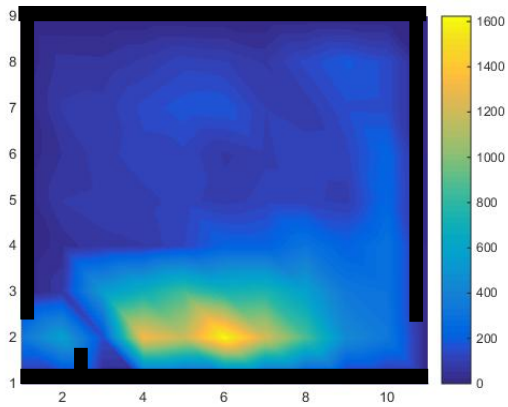
Os resultados de tensão cisalhante de Reynolds máxima para 12% podem ser vistos pela Figura 38 e ela indica o mesmo comportamento verificado nas outras declividades para todas as vazões, desta forma, percebe-se que o aumento tanto da vazão como da declividade tornam a região da abertura mais danosa para a passagem dos peixes, pois, possui valores de tensão cisalhante de Reynolds superiores a 500 N/m<sup>2</sup>. No entanto, verifica-se que a redução de área, com relação a esse parâmetro, para a passagem de peixes não se mostra expressiva pela variação de vazões, e sim pela variação de declividade.



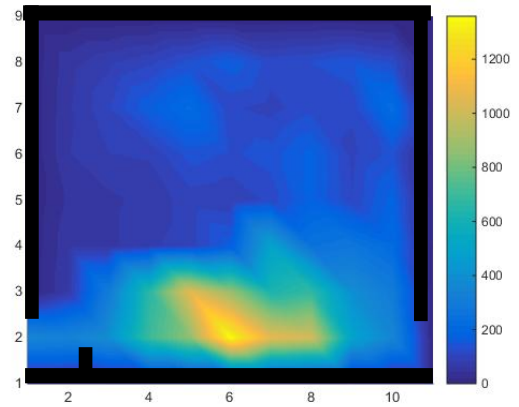
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



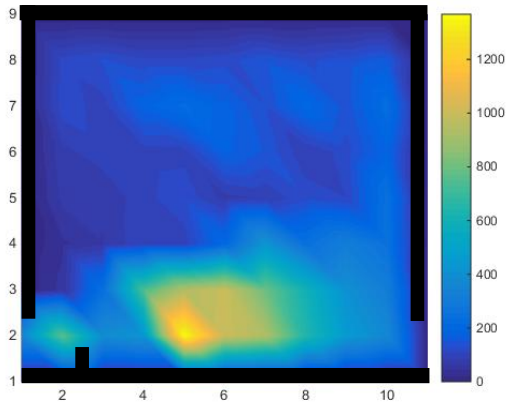
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s

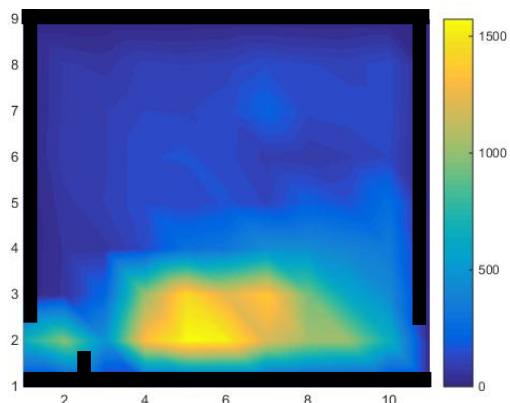


(d) 2,14m<sup>3</sup>/s

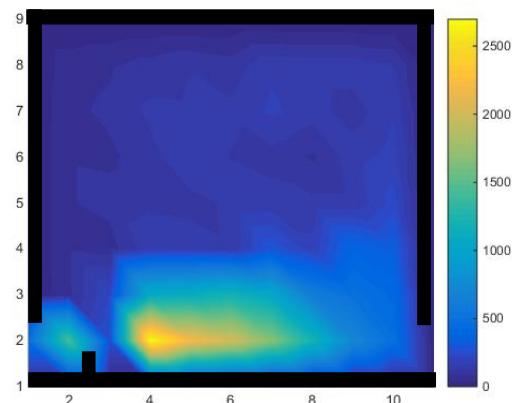


(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

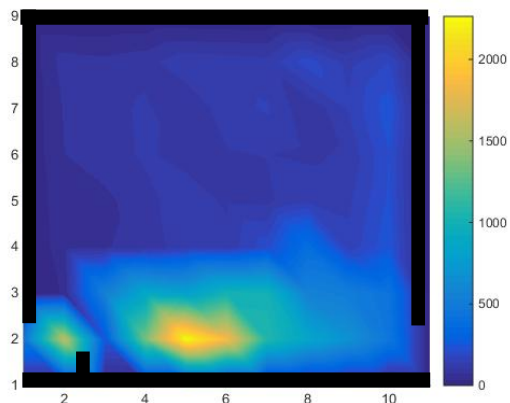
**Figura 35** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds máxima para a declividade de 6% (valores em N/m<sup>2</sup>).



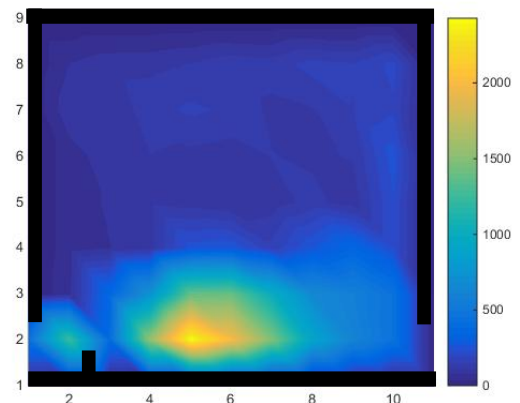
(a)  $1,50\text{m}^3/\text{s}$



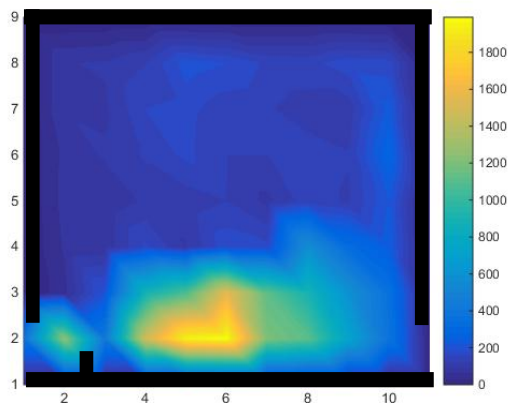
(b)  $1,71\text{m}^3/\text{s}$



(c)  $1,92\text{m}^3/\text{s}$

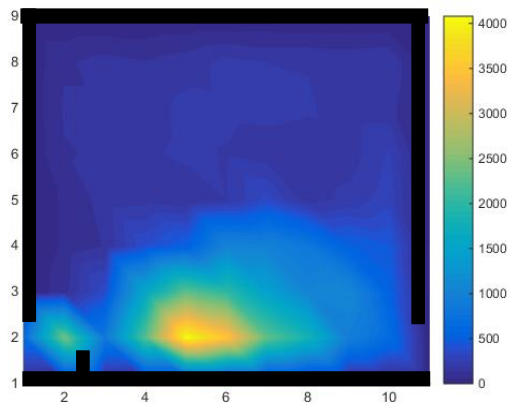


(d)  $2,14\text{m}^3/\text{s}$

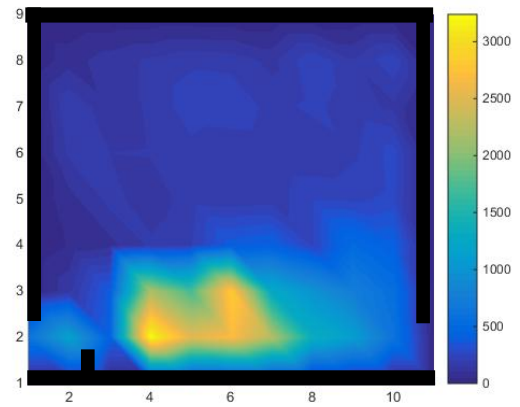


(e)  $2,35\text{m}^3/\text{s}$

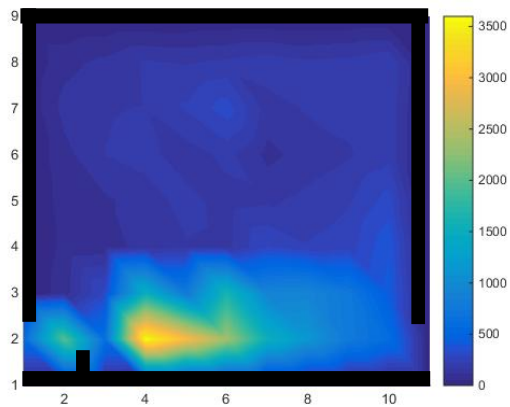
**Figura 36** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds máxima para a declividade de 8% (valores em  $\text{N}/\text{m}^2$ ).



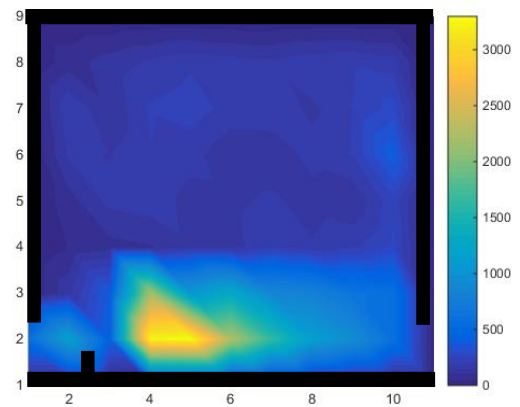
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



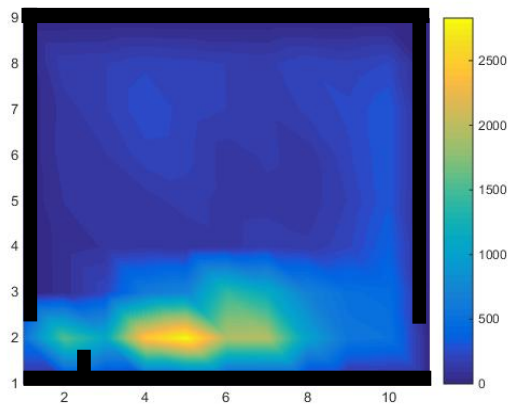
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s

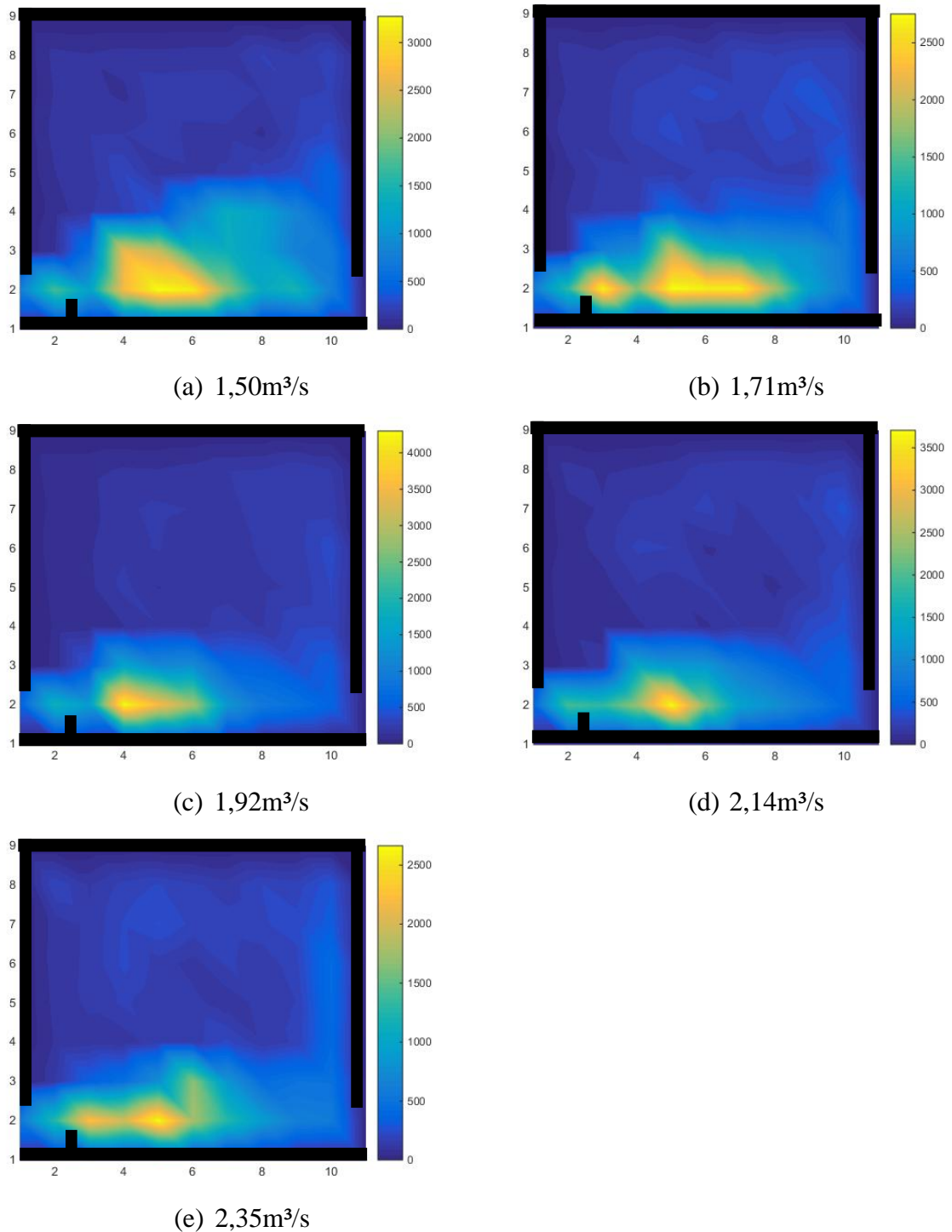


(d) 2,14m<sup>3</sup>/s



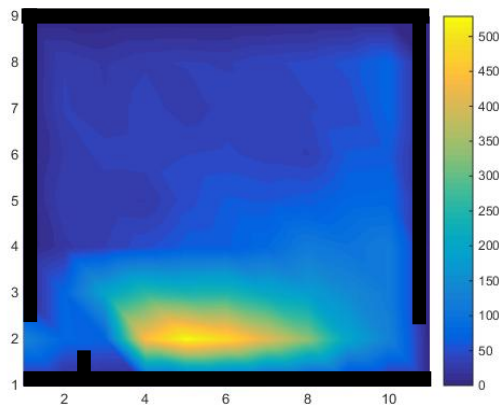
(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

**Figura 37** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds máxima para a declividade de 10% (valores em N/m<sup>2</sup>).

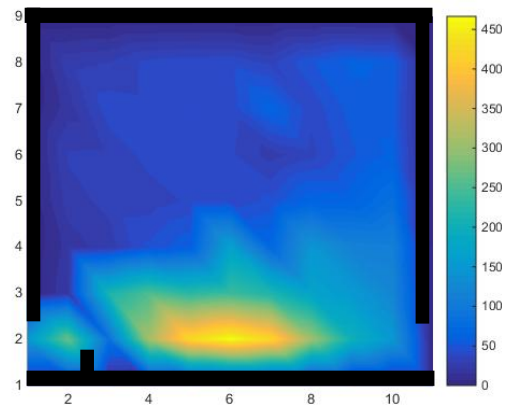


**Figura 38** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds máxima para a declividade de 12% (valores em  $\text{N}/\text{m}^2$ ).

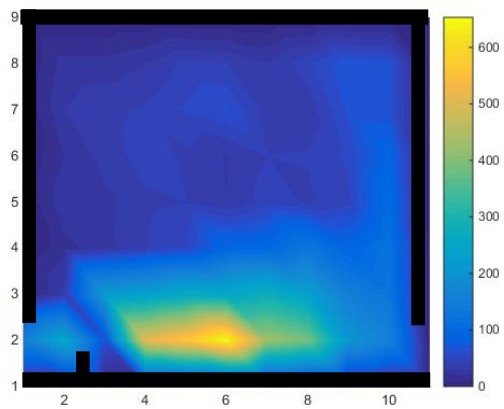
Para efeito comparativo foi feito o levantamento para a tensão de cisalhamento considerando as flutuações médias das velocidades em x e y. A **Figura 39** apresenta os resultados de tensão cisalhante de Reynolds para a declividade de 6% nas cinco vazões.



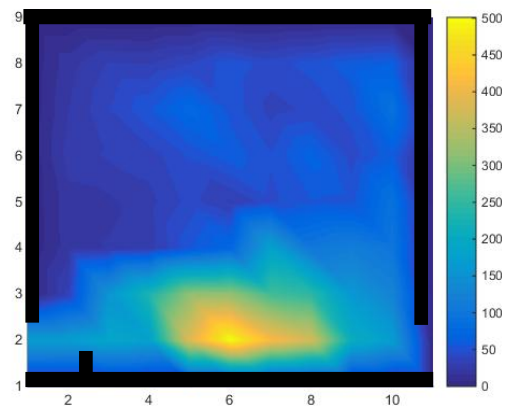
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



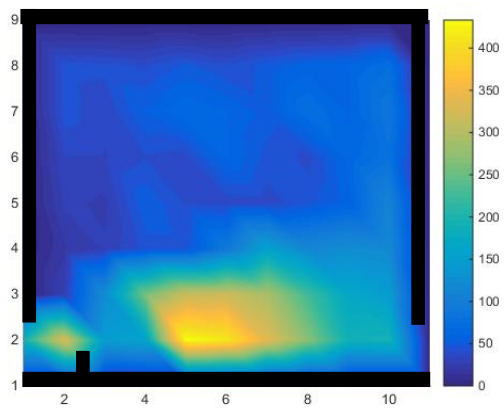
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s



(d) 2,14m<sup>3</sup>/s



(f) 2,35m<sup>3</sup>/s

**Figura 39** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds para a declividade de 6% (valores em N/m<sup>2</sup>).

Pelos resultados apresentados na Figura 39 pode-se observar que a vazão não causa grandes alterações nos valores de tensão cisalhante de Reynolds dentro do tanque. Verifica-se somente um ligeiro aumento na região onde esse parâmetro é representativo, ficando limitado à região de escoamento principal.

A mesma observação para a declividade de 6% é verificada para a declividade de 8% na Figura 40, onde os valores poucas alterações de valores e aumento de área com valores representativos de tensão de Reynolds.

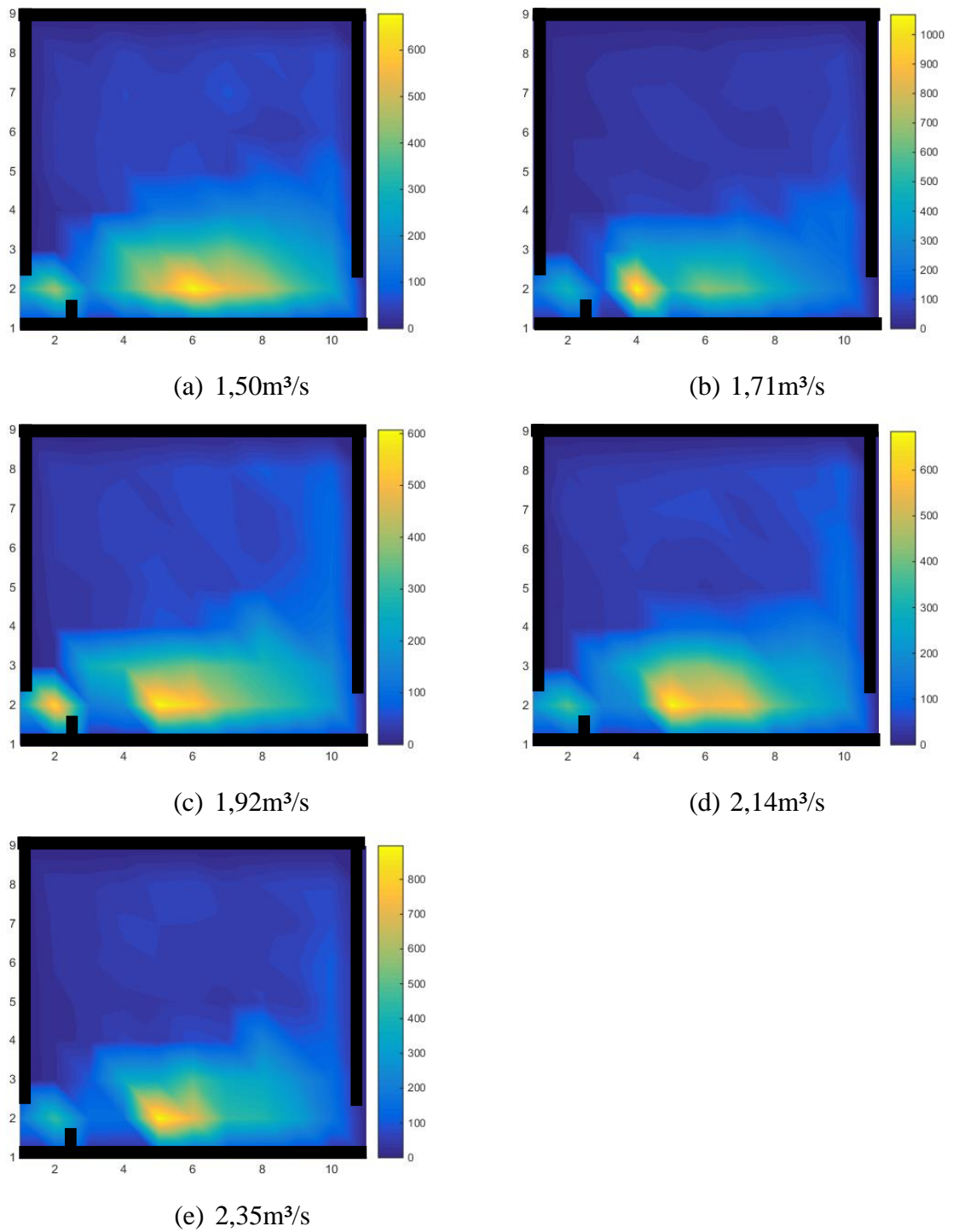
A Figura 41 apresenta os resultados de campo de tensão cisalhante de Reynolds para a declividade de 10%. E observa-se que os valores de tensão cisalhante de Reynolds aumentam na região de escoamento principal chegando a valores superiores a  $1.800 \text{ N/m}^2$ , porém, a região onde estes valores são representativos continuam sendo limitados a essa região.

Pela Figura 42 verifica-se os resultados do campo de velocidades para a declividade de 12% nas cinco vazões. E pode se observar o mesmo comportamento observados nas outras declividades para todas as vazões, desta forma, observa-se que o aumento tanto da vazão como da declividade tornam a região de escoamento principal mais danoso para a passagem dos peixes, pois, possui valores de tensão cisalhante de Reynolds superiores a  $500 \text{ N/m}^2$ . No entanto, verifica-se que a redução de área, com relação a esse parâmetro, para a passagem de peixes não se mostra expressiva.

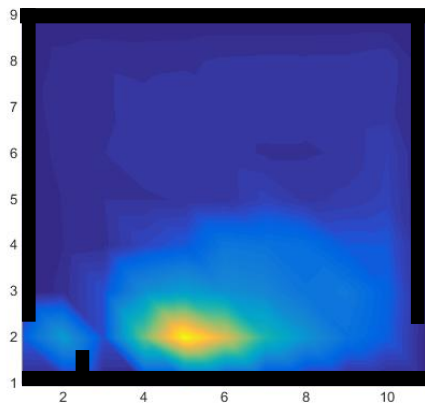
No intuito de comparar esses valores com os observados em Igarapava a Figura 43 apresenta o resultado do mapeamento de tensão cisalhante de Reynolds dentro do tanque do MTP instalado nessa UHE.

Pela representação dos resultados encontrados na UHE de Igarapava pode-se observar o mesmo comportamento, em que valores maiores e menores de tensão cisalhante de Reynolds ocorrem na região de escoamento principal. Pelo resultado apresentado pode-se observar que a melhor representação desse parâmetro é considerando a tensão a cada medida é encontrando pela flutuação instantânea dos valores obtidos.

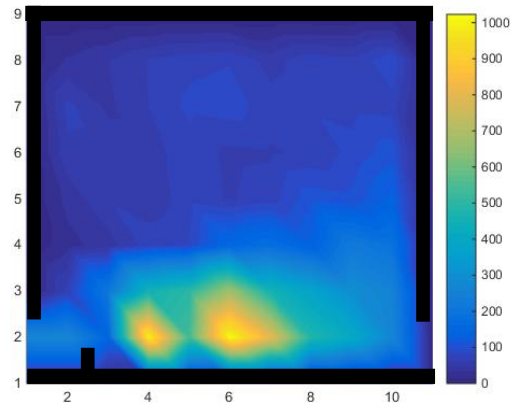
Sendo assim, na comparação das duas formas de se encontrar a tensão cisalhante de Reynolds observa-se que o levantamento em campo (protótipo do MTP de Igarapava) é próximo ao observado com a metodologia de tensão instantânea e depois a média das tensões locais.



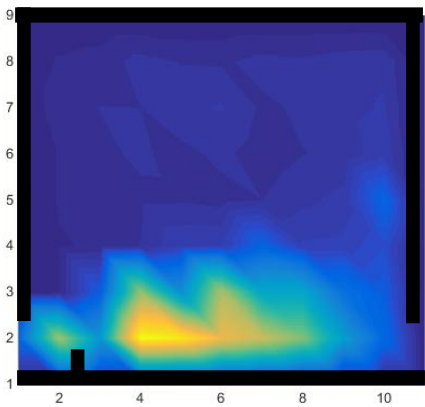
**Figura 40** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds para a declividade de 8% (valores em  $\text{N}/\text{m}^2$ ).



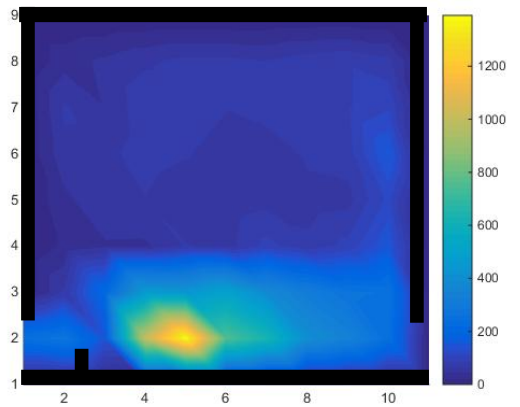
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



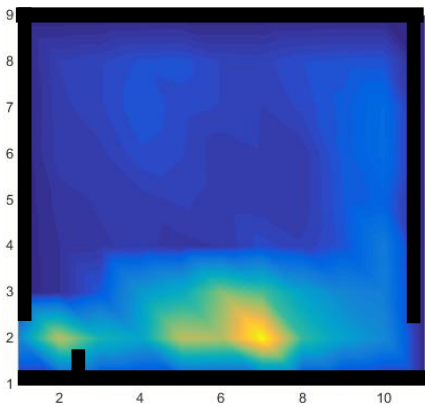
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s

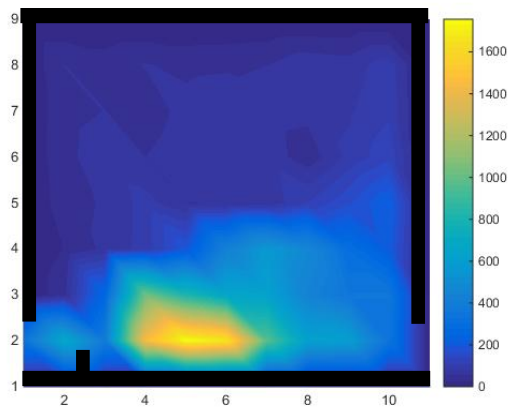


(d) 2,14m<sup>3</sup>/s

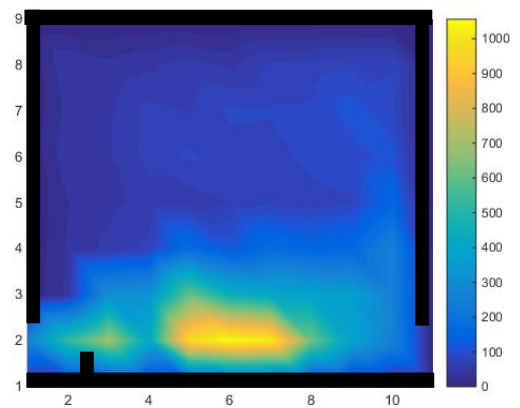


(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

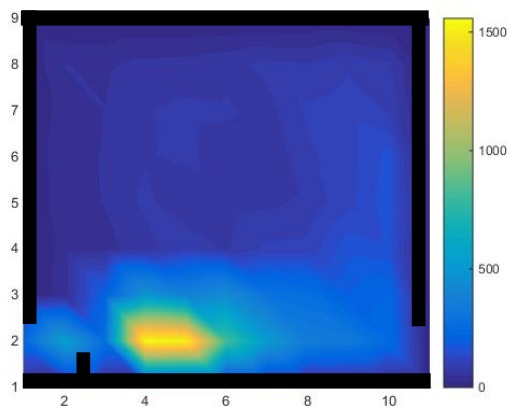
**Figura 41** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds para a declividade de 10% (valores em N/m<sup>2</sup>).



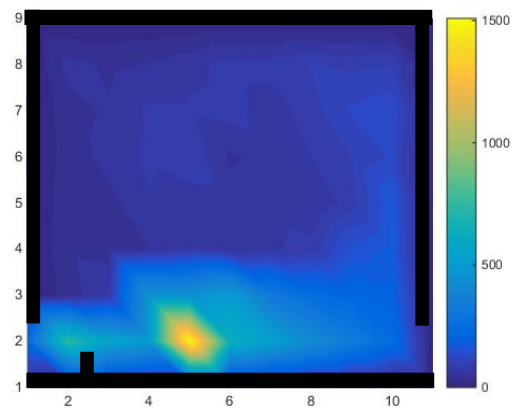
(a) 1,50m<sup>3</sup>/s



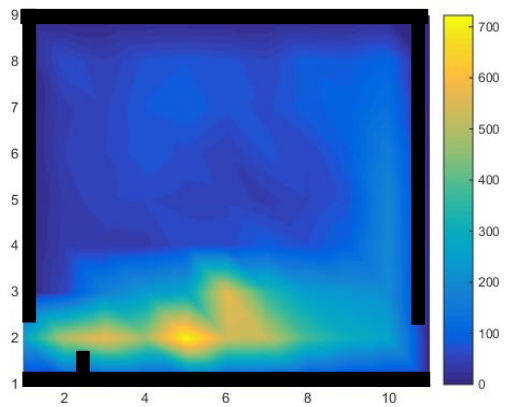
(b) 1,71m<sup>3</sup>/s



(c) 1,92m<sup>3</sup>/s

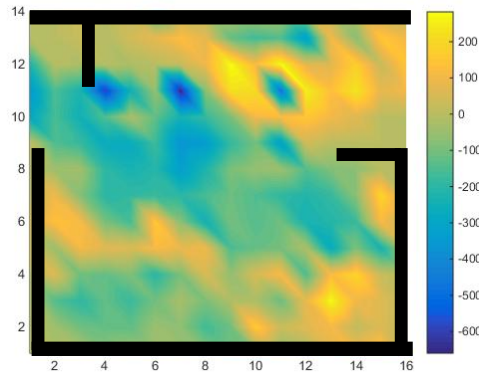


(d) 2,14m<sup>3</sup>/s



(e) 2,35m<sup>3</sup>/s

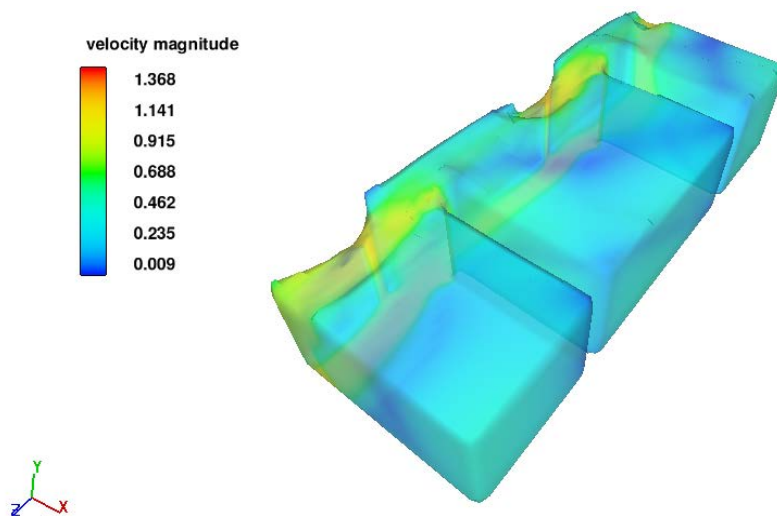
**Figura 42** – Representação dos resultados do campo de velocidades para a declividade de 12% (valores em N/m<sup>2</sup>).



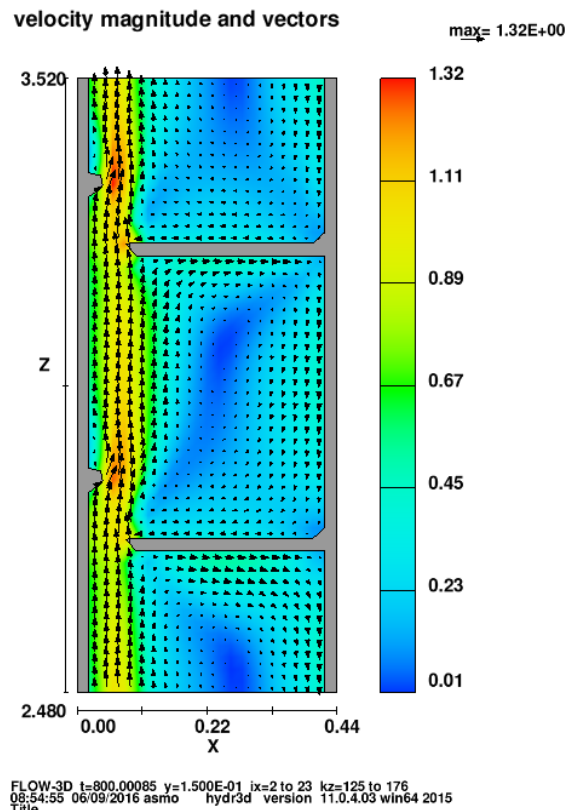
**Figura 43** – Representação dos resultados do campo de tensão cisalhante de Reynolds para o MTP da UHE de Igarapava (valores em N/m<sup>2</sup>).

#### 5.4 Simulação Numérica

Para a simulação numérica computacional fluidodinâmica realizada no Flow3D conforme indicado no capítulo de metodologia, o cenário de declividade de 6% e vazão de 2,35m<sup>3</sup>/s foi escolhido para a simulação. Os resultados em perspectiva tridimensional, com as velocidades representadas em cores são apresentados no tanque central na Figura 44, já os resultados em planta, também em cores e no tanque central são apresentados na Figura 45.



**Figura 44** - Resultado da Simulação Hidrodinâmica com a Velocidade em m/s.

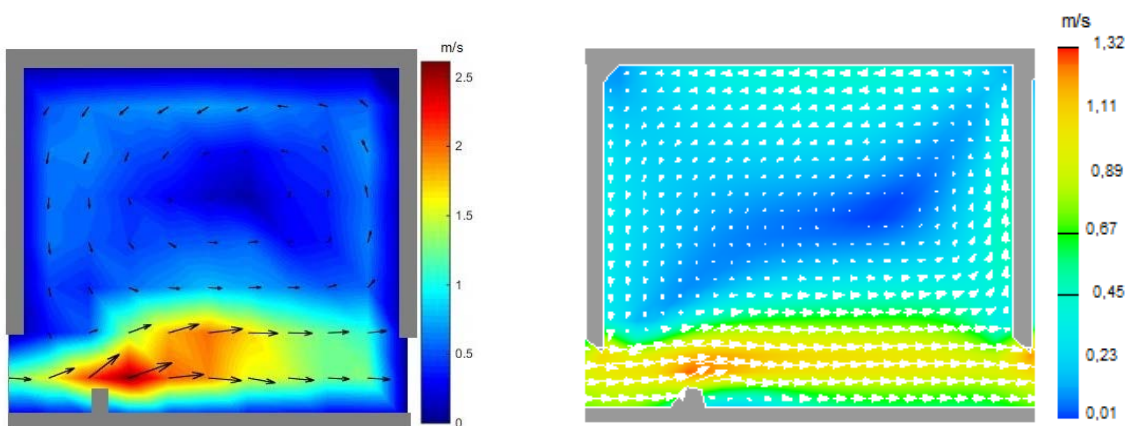


**Figura 45** - Resultados da Simulação Hidrodinâmica com a Velocidade em m/s e as Dimensões em Metros.

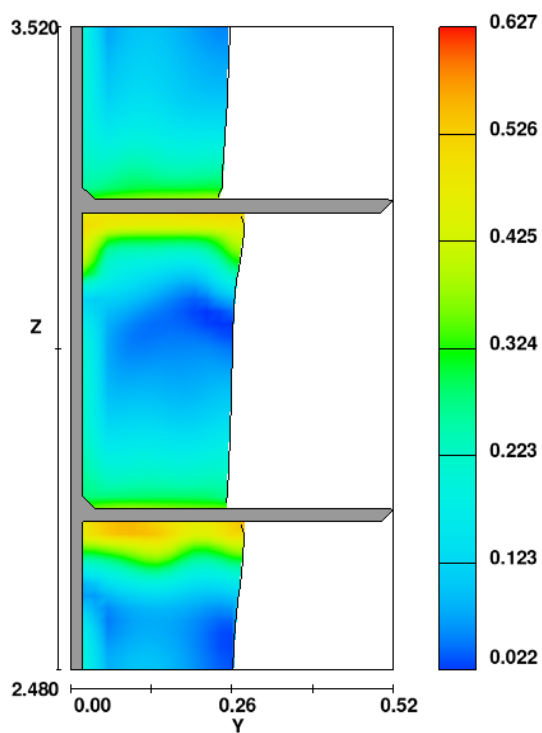
Pela Figura 46 é possível verificar que os resultados em termos de fluxo de escoamento são muito parecidos, com duas áreas distintas bem definidas para os dois casos, uma área de maiores velocidades a esquerda, indicando o fluxo principal, ocupando cerca de 1/3 da área disponível do tanque e outra área com velocidades menores, próximas de zero, indicando a região de repouso para os peixes, ocupando cerca de 2/3 da área do tanque. Apesar da correlação das linhas de fluxo cabe observar que a velocidade máxima experimental chegou na ordem de 2,5 m/s, já o máximo numérico foi de 1,3 m/s indicando que ainda é necessária uma investigação em termos de sensibilidade do modelo numérico para uma melhor calibragem deste modelo. Análise esta que não foi proposta para o presente trabalho, mas que é fortemente indicada para os futuros trabalhos.

Com o intuito de corroborar com o que já é amplamente aceito, e que foi levado em consideração no presente trabalho, de que as variações de velocidade na vertical pouco influenciam na determinação da passagem de peixes pela escada construiu-se a Figura 47.

Como pode ser observado, pela Figura 47, os valores de velocidades na maior parte do tanque em valores abaixo de 0,2 m/s.



**Figura 46** - Comparativo entre Resultados Experimentais e Computacionais



**Figura 47** – Resultado da Variação da Velocidade (m/s) no Meio do Tanque Central.

## 6 CONCLUSÕES

Ao fazer a comparação dos resultados dos parâmetros hidráulicos avaliados para as diferentes vazões e declividades estudadas pode-se observar que o fator que influencia na limitação de área disponível para a passagem dos peixes no tanque é a dissipação de energia. Chega-se a essa afirmação uma vez que, para as vazões e declividades testadas, o campo de velocidades e de tensão cisalhante de Reynolds não promoveram redução de área considerável dentro do tanque por onde os peixes conseguiriam passar. Observa-se, toda via, que a tensão cisalhante de Reynolds é mais relevante que a velocidade para a determinação dos fatores limitantes.

Os resultados do campo de velocidades, dentro do tanque, não sofrem grandes alterações com relação à redução de área possível de passagem, ou seja com velocidade inferior a 1,3 m/s, com a variação da declividade e vazão. O que ocorre é o aumento das velocidades na região de escoamento principal chegando a valores muito superiores ao admitidos como ideal. No entanto, em todas as situações os peixes conseguiriam passar utilizando regiões com menores velocidades.

Com relação à tensão cisalhante de Reynolds, em todas as situações de vazão e declividade, os peixes encontram áreas possíveis de passagem de forma onde os valores não atingem o limite definido que foi de  $500 \text{ N/m}^2$ . No entanto, existe uma necessidade de verificar a influência do tempo de exposição nas diferentes magnitudes de tensão e, assim, examinar uma real limitação desse sistema.

Para todas as condições testadas as regiões consideradas como ideais para a passagem dos peixes, com relação a dissipação de energia, foi muito limitada. E a vazão e declividade influenciam na variação desse parâmetro de maneira considerável. No entanto, como não se conhecem os valores aceitáveis para os peixes de clima neotropical, os resultados foram comparados aos valores levantados em campo na UHE de Igarapava. Essa comparação foi utilizada pelo fato de se saber que diferentes espécies de couro e escamas conseguem utilizar o sistema na condição usual que é bem próxima da abordada na condição de menor declividade e vazão. Comparados os resultados encontrados em Igarapava com os valores de modelo, verifica-se que o limite de declividade dever ser de 8%, em que se observam valores na região de recirculação central entre os anteparos (ou região de descanso) inferiores aos valores limites. Pois, com o para declividades maiores são muito reduzidas as áreas onde se observa valores de dissipação de energia, menores que  $191 \text{ W/m}^3$ . Com o calculo utilizando equação de Bell (1973) a limitação seria as três primeiras vazões da declividade de 6%. No entanto, algumas cuidados

devem ser tomados visto que o MTP da UHE de Igarapava possui configuração diferente daquela testada no modelo reduzido.

O ideal seria a simulação dessas condições dentro de um canal com dimensões maiores, e colocar peixes de escama e couro, que se conheça a capacidade natatória, para a devida comprovação.

Com relação às simulações computacionais, foi possível verificar uma boa correlação das linhas de fluxo no tanque central com relação aos resultados experimentais, porém os valores máximos encontrados no experimento, para o cenário escolhido para a comparação, foram maiores do que aqueles encontrados na simulação numérica. Isso indica uma necessidade de uma análise de sensibilidade para trabalhos futuros no qual se pretendam utilizar os modelos numéricos para as mudanças de projeto e design da escada de peixes.

## RECOMENDAÇÕES

Para sanar as dúvidas sobre a questão da dissipação de energia dentro do tanque em relação aos peixes recomenda-se:

- Realização de testes com alguns indivíduos reproduzindo as condições descritas nesse trabalho;
- Utilização do modelo simulado computacionalmente e validado para a verificação da condição de escoamento em diferentes condições de colocação de anteparo e consequentemente dimensões de tanque, situação de colocação de anteparos com formas e relevos diferentes;
- Além disso, busca-se construir sistemas com paredes de anteparos flexíveis, para que esses canais possam ser navegáveis. Porém, a determinação da influência desse sistema nos parâmetros hidráulicos do tanque deve ser estudado;
- Determinação da influência desses parâmetros na colocação de plantas aquáticas dentro do sistema para que funcione com dissipador de energia e torne o sistema mais atrativo para os peixes;
- Verificação da influência da tensão cisalhante de Reynolds no tempo com relação ao tempo de exposição;
- Verificar outros parâmetros como intensidade turbulenta, com relação as condições aceitáveis para peixes neotropicais;
- Verificação da dissipação máxima aceitável para peixes neotropicais;
- Análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada do modelo numérico para uma melhor calibração deste modelo.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, A. A., THOMAZ, S. M., GOMES, L. C., *Conservação da Biodiversidade em Águas Continentais do Brasil*, Megadiversidade, vol. 1, n. 1, Jul. 2005.
- ALVAREZ-VÁZQUEZ, L. J., MARTÍNEZ, A., RODRÍGUEZ, C., VÁZQUEZ-MÉNDES, M.E., VILAR, M. A. *Optimal shape design for fishways in Rivers*. Mathematics and computers in simulation, 218-222 p., 2007.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução nº 394, 1998.
- ARMSTRONG, G.S., APRAHAMIAN, M.W., FEWINS, G. A., GOUGH, P. J., READER, N.A., VARALLO, P. V., *Environment Agency Fish Pass Manual: Guidance Notes On The Legislation, Selection And Approval Of Fish Passes In England And Wales*. Environment Agency, Almondsbury, Bristol 369 pp., 2010.
- BELL, M. C., *Fisheries Handbook of Engineering Requeriments and Biological Criteria*, Corps of Engrs., North Pacific Div., Portland, Oreg., 490 pp., 1973.
- BERNARD, R.J., JOHSON, J., BROOKS, P., BATES, K.M., HEINER, B., KLAVAS, J.P., PODER, D.C., SMITH, P.D., POWERS, P.D., *Water crossings design guindelines*, Washington Department of fish and Wildlife. Olimpia, 300 p., 2013.
- BIZZOTTO, P. M. *Trânsito de peixes na escada da UHE-Igarapava, Rio Grande, Alto Paraná*. Tese de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte. 52p., 2006.
- BRONZATTI, F. L., NETO, A. I. *Matrizes Energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030*. In: XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2008, Rio de Janeiro, 2008.
- CADA, G.F., CARLSON. T., FERGUSON, J., RICHMOND, M., SALE, M., *Exploring the role of shear stress and severe turbulence in downstream fish passage*, Brookshies, P.A. (Ed.) Proceedings of waterpower'99. Hidro's future: Technology, Markets, and Policy. American Society of Civil Engineers, Reston, V.A. 10 pp, 1999.
- CEMIG, *Instalação de Usinas Hidrelétricas*, 2002, Disponível em: [www.cemig.com.br](http://www.cemig.com.br) Acesso em abril de 2004.

COLETTI, J. Z., *Características do Escoamento ao Longo de Uma Escada de Peixes do Tipo Ranhura Vertical*. 2005. 100 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DEMIRBAS, A., *A Renewable perspective for sustainable energy development in Turkey? The case of small hydropower plants*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – Elsevier – Volume 11, Issue 9, Pages 2152-2165, 2007.

DUARTE, B. A. F., SANTOS, H. A. *Tensão de Reynolds e Velocidade Média em uma Escada para Peixes do Tipo Ranhura Vertical: Comportamento Preferencial da Espécie Leporinus reinhardti*. *RBRH* V. 19 n.2 Abr/Jun 2014.

ELETROBRÁS, *Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT*, 2012. Disponível em: <[www.eletronbras.com](http://www.eletronbras.com)>. Acesso em 24 de set. 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS AND DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (FAO/DVWK). *Fish Passage – Design, Dimensions and Monitoring*. Rome, Italy, p. 119 2002.

GAO, Z., ANDERSSON, H.I., DAI, H., JIANG, F., ZHAO, L., *A new Eulerian-Lagrangian agent method to model fish paths in vertical slot fishway*, *Ecological Engineering*, v. 88, p. 217-225, 2016.

JACKSON, D.C., MARMULLA, G. *The influence of dams on river fisheries*, in: G. Marmulla (Ed.), *Dams, Fish and Fisheries. Opportunities, challenges and conflict resolution*. FAO, Fisheries Technical Paper 419, Rome, Italy, pp. 1–44, 2001.

KATOPODIS, C., *Introduction to Fishway Design*. Freshwater Institute, Canada Fisheries and Oceans, Winnipeg, MB, Canada, 68 p., 1992.

KOBUS, Helmut, *Hydraulic Modelling*, Distribuído por Berlag Paul Parey – Hamburg – Berlin, 1980.

LARINIER, M. L, TRAVADE, F.. *The developement and Evoluation of Downstream By Passes for Juvenile Salmonoides at Small Hydroelectric Plants in France*, American Fisheries Society, EUA, 1999.

LARINIER, M. *Dams and fish migration*. In: Marmulla, G. (Ed.), *Dams, Fish and Fisheries, Opportunities, Challenges and Conflict Resolution*. FAO, Rome, Italy. <http://www.dams.org/>, 2001.

MALISKA, C.R., *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, LTC, Rio de Janeiro, 1995.

MARRINER, B.A., BAKI, A.B.M., ZHU, D.Z., COOKE, S.J., KATOPODIS, C., *The hydraulics of a vertical slot fishway: A case study on the multi-species Vianney-Legendre fishway in Quebec, Canada*, *Ecological Engineering*, v.90, p.190-202, 2016.

PINTO, D. J. J. M., *Caracterização Experimental do escoamento em Canais de Secção Composta*. 2010. 98 f. – Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2010.

PLAUT, I., *Critical Swimming Speed: Its ecological Relevance*, *Comparative Biochemistry Part A*, n. 131, p. 41–50, 2001.

RODRÍGUEZ, T.T., AGUDO, J.P., MOSQUERA, L.P., GONZÁLEZ, E.P., *Evaluationg vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities*, *Ecological Engineering*, vol. 27, p. 37-48, 2006.

RODRIGUEZ, Á., BERMÚDEZ, M., RABUNAL, J., PUERTAS, J., DORADO, J., PENA, L., BALAIRÓN, L., *Optical fish trajectory measurement in fishways through computer visionand artificial neural networks*. *Journal Comput. Civil Engineering* 25, 291–301, 2011.

SANAGIOTTO, D.G., *Análise da macroturbulência do escoamento em escadas para peixes por bacias sucessivas*, Tese do Programa de Pós graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SANTOS, H. A., *Metodologia de Medição de Velocidade Prolongada Crítica e de Explosão das Espécies de Peixes Migradoras do Brasil*. 2004. 132 f. Tese (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

SANTOS, H.A.; POMPEU, PS.; VICENTINI, GS. and MARTINEZ, CB.. *Capacidade natatória da espécie neotropical de água doce: Pimelodus maculatus Lacepède, 1803*. Brazilian Journal of Biology. [online]. vol.68, n.2, pp. 433-439, 2008.

SANTOS, H.A.; VIANA, E.M.F., POMPEU, P.S.; HYPERLINK "<http://www.scielo.br/cgi-bin/wxis.exe/iah/?IsisScript=iah/iah.xis&base=article%5Edlibrary&format=iso.pft&lang=i&nxtAction=lnk&indexSearch=AU&exprSearch=VICENTINI,+GS.>" e MARTINEZ, CB., *Optimal swim speeds by respirometer: na analysis of three neotropical species*, Neotropical Ichthyology, n 10, p. 805-811, 2012.

SILVA, A. T., SANTOS, J. M. FERREIRA, M. T., PINHEIRO, A. N., KATOPODIS, C.. *Effects of Water Velocity and turbulence on the Behavior of Iberian Barbal (Luciobarbus bocagei, Teindanchner 1846) in a Experimental Pool-Type Fishway*. Rever Res. n. 27, 360-373, 2011.

SILVA, A. T., KATOPODIS, C., SANTOS, J. M., FERREIRA, M. T., PINHEIRO A. N., *Cyprinid Swimming Behavior in Response to Turbulent Flow*, Ecological Engineering, n. 44, 2012.

STREETER, V.L., WYLIE, E.B., *Semelhança e Modelo Reduzido*, 7ª edição, Editora MacGraw Hill do Brasil, São Paulo – Brasil, 1980.

TOLENTINO, B.S., SAMPAIO, M.C., CASTRO, A.L.P., MARTINEZ, C.B., FARIA, M.T.C., VIANA, E.M.F., *Verificação da dissipação de energia em tanques de um Mecanismo de Transposição de Peixes do tipo ranhura vertical*, XXVI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, 2014.

TOMÉ, L. F. O. T., MARTINEZ, C. B., FARIA, M. T. C., SILVA, L. G. M., SANTOS, H. A., VIANA, E. M. F., *Verificação da Variação do Comportamento Hidráulico em um Mecanismo de Transposição de Peixes do Tipo Escada em Diferentes Declividades*, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 18, n. 2, Abr/Jun de 2013.

TRAVADE, F. e LARINIER, M., *Fish Locks and Fish Lifts*, In: *BFPP (Bulletin Francais de la Perche et de la Pisciculture) – Fishways – Biological Basis, Design Criteria and Monitoring*, fevereiro, 2002, cap.7, p.102-118.

VIANA, E. M. F., *Mapeamento do campo de velocidades em Mecanismo de Transposição de Peixes do tipo Slot Vertical em diferentes escalas*, Tese de Doutorado, Programa de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, 2005.

VIANA, E. M. F., MARTINEZ, C.B., MARQUES, M.G. *Mapeamento do Campo de Velocidades em Mecanismos de Transposição de Peixes do Tipo Ranhura Vertical Construído na UHE Igarapava*, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, volume 12 n.1 Jan/Mar pag. 5-15 Porto Alegre , 2007.

VIANA, E. M.F., MARTINEZ, C.B., FARIA, M. T.C., *Estudo do comportamento hidráulico de um novo projeto de mecanismo de transposição de peixes do tipo escada*, XXIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Punta Del Este, Uruguai, Novembro 2010.