

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

MODELAGEM DO ESCOAMENTO EM UMA ESCADA DE PEIXES DO TIPO
RANHURA VERTICAL

CAMILA YURI LIRA UMEDA

CAMPO GRANDE, MS

2014

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

MODELAGEM DO ESCOAMENTO EM UMA ESCADA DE PEIXES DO TIPO
RANHURA VERTICAL

CAMILA YURI LIRA UMEDA

Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para a obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Johannes Gérson Janzen.

CAMPO GRANDE, MS

Agosto / 2014

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Johannes Gérson Janzen pela orientação, ensinamentos, conselhos, compreensão e paciência ao longo dos últimos anos.

A *Northwest Hydraulic Consultants* (NHC) e a *Brookfield Renewable Energy*, por fornecerem e autorizarem o uso dos dados para que esta pesquisa fosse realizada.

Aos membros da banca examinadora por gentilmente cederem seu tempo e conhecimento para aprimorar este trabalho, especialmente ao Dr. Guilherme de Lima.

Ao suporte fornecido, na concessão de uma bolsa de estudos, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/FUNDECT).

Aos colegas e amigos do laboratório de Simulação Computacional de Fluidos, RESAN e LENHS, pelos bons momentos e apoio.

E aos meus pais e a Cleonice, por apoiarem e incentivarem meu desenvolvimento.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. Introdução	11
2. Dados sobre a Escada de Peixes Modelada	17
3. Modelagem Unidimensional do escoamento em Escada de Peixe do Tipo Ranhura Vertical	20
3.1. HEC-RAS	20
3.1.1. Equações Governantes	20
3.1.2. Definição do Domínio Computacional e Condições de Contorno.....	22
3.1.3. Calibração do Modelo.....	23
3.2. Resultados e Discussão	25
3.3. Comentários Finais sobre o Estudo do Comportamento Hidráulico Utilizando um Modelo 1D.....	34
4. Modelagem Tridimensional do escoamento em Escada de Peixes do Tipo Ranhura Vertical	36
4.1. Dinâmica dos Fluidos Computacional	36
4.1.1. Equações Governantes	36
4.1.2. Geometria e Malha.....	38
4.1.3. Condições de Contorno e Iniciais	40
4.2. Resultados e Discussão	40
4.3. Comentários Finais sobre o Estudo do Comportamento Hidráulico Utilizando um Modelo 3D.....	48
5. Conclusões e Recomendações	50
REFERÊNCIAS	52

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Fotos do modelo físico: (a) Vista com os padrões de escoamento superficial próximo da saída da escada de peixes durante realização de teste; (b) Vista com os padrões de escoamento no tanque de entrada da escada de peixes durante realização de teste; e (c) Vista da escada de peixes em torno da estrutura de admissão. Fonte: NHC, 2013. 17
- Figura 2. Localização dos pontos de medição de velocidades e identificação dos tanques na configuração final da escada de peixes. Fonte: NHC, 2013..... 18
- Figura 3. Detalhes da geometria nas ranhuras, com unidades em metros: (a) planta típica, (b) corte típico e (c) vista isométrica. Fonte: Adaptado de NHC (2013). 19
- Figura 4. Perspectiva em três dimensões da geometria simplificada da escada de peixes, com detalhe de uma seção com ranhura vertical. 22
- Figura 5. Quatro ciclos (total de 16 simulações) do planejamento fatorial 2^2 , onde é possível localizar a região com os menores erros médios. 25
- Figura 6. Diagrama de Pareto para os quatro ciclos do planejamento fatorial: primeiro ciclo (a), segundo ciclo (b), terceiro ciclo (c) e quarto ciclo (d). O diagrama mostra o valor absoluto dos efeitos da interação entre os coeficientes de contração e de expansão (AB), o efeito principal do coeficiente de contração (A) e o efeito principal do coeficiente de expansão (B). Ademais, há uma linha no diagrama que serve como referência para os efeitos que são significativos, considerando uma significância $\alpha = 0.1$ 26
- Figura 7. Gráfico com a distribuição dos EMA calculados para as variações dos coeficientes de contração e expansão nas vazões de calibração C1 (a), C2 (b) e C3 (c) e do erro médio das três vazões (d). As cores dos pontos indicam a magnitude do erro no nível d'água (ver legenda). 27
- Figura 8. Distribuição do erro absoluto em cada vazão de calibração. A linha horizontal superior de cada retângulo representa o terceiro quartil, a segunda linha representa a mediana e a linha horizontal inferior representa o primeiro quartil. As linhas verticais indicam os valores máximos e mínimos do erro. 29

Figura 9. Perfil dos níveis de água simulados (WS) e valores observados (OWS) para as vazões de calibração.....	30
Figura 10. Variação da profundidade em função da vazão no tanque de saída da escada de peixes (Curva-chave): (♦) Simulação HEC-RAS, (X) Modelo físico.	32
Figura 11. Relação da vazão adimensional (Q^*) e profundidade adimensional (Y_m/b) nos tanques da escada de peixes. As linhas tracejadas na horizontal e na vertical representam, respectivamente, a profundidade adimensional mínima exigida para a passagem de peixes e a vazão adimensional mínima necessária para atender a condição de profundidade.	32
Figura 12. Relação entre a energia dissipada adimensional E^* e a vazão adimensional Q^* . As linhas tracejadas na horizontal e na vertical representam, respectivamente, a energia dissipada adimensional máxima recomendada para a passagem de peixes; e a vazão adimensional máxima necessária para atender a condição de dissipação de energia.	34
Figura 13. Visão geral do domínio e malha da escada de peixes. As setas, na parte superior da figura, indicam a condição de entrada do escoamento. Na parte inferior, as setas indicam a condição de fronteira aberta, atribuída nos locais por onde os peixes acessam a escada.	38
Figura 14. Detalhe da malha na região da ranhura, após o refinamento.....	39
Figura 15. Vetores velocidade e mapa de contorno da intensidade da velocidade para o tanque 8 em (a) $y = 0.25h$, (b) $0.5h$ e (c) $0.75h$	41
Figura 16. Vetores velocidade e mapa de contorno da intensidade da velocidade na vertical na seção da ranhura, no jato de saída. Maiores velocidades encontradas na região à esquerda na imagem, a qual corresponde, considerando o sentido do escoamento, à direita na ranhura. ...	42
Figura 17. Vetores velocidade e mapa de contorno da intensidade da velocidade na profundidade $0.5h$ para tanques 7 a 10.....	42
Figura 18. Perfil d'água com a distribuição da velocidade ao longo da escada.....	44
Figura 19. Mapa de contorno da velocidade do escoamento (a) ao longo da escada e (b) no tanque 8.	45

Figura 20. Vetores velocidade e mapa de contorno da energia cinética turbulenta para $y = 0.5h$: (a) tanque n° 8, (b) tanque de descanso. As regiões em vermelho possuem valores iguais ou superiores a $0.35 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 46

Figura 21. Vetores velocidade e mapa de contorno da taxa de dissipação de energia para $y = 0.5h$: (a) tanque n° 8, (b) tanque de descanso. As regiões em vermelho possuem valores iguais ou superiores a $200 \text{ W}/\text{m}^3$ 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condições de contorno definidas.....	23
Tabela 2. Calibração do modelo com os coeficientes de contração e expansão de 0.18 e 0.84, respectivamente.	28
Tabela 3. Verificação das velocidades simuladas com as medidas no modelo físico.	31
Tabela 4. Tabela comparativa das velocidades medidas e simuladas nas regiões das ranhuras.	43
Tabela 5. Tabela comparativa do níveis e alturas d'água simuladas e medidas.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Unidimensional
3D	Tridimensional
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CEL	<i>CFX Expression Language</i>
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
EMA	Erro médio absoluto
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center – River Analysis System</i>
NHC	<i>Northwest Hydraulic Consultants</i>
RANS	<i>Reynolds Average Navier Stokes</i>
STP	Sistemas para transposição de peixes
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

RESUMO

UMEDA, C. Y. L. (2014). Modelagem do Escoamento em uma Escada de Peixes do Tipo Ranhura Vertical. Campo Grande, 2014. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

Este trabalho analisou o comportamento hidráulico de uma escada de peixes do tipo ranhura vertical utilizando modelagens uni e tridimensionais. Os resultados foram comparados com dados experimentais obtidos em um modelo em escala reduzida (1:12). Os níveis d'água simulados nos modelos 1D e 3D foram muito próximos dos níveis d'água obtidos com o modelo em escala reduzida e ficaram com uma diferença média de ± 0.04 m. A calibração do modelo 1D foi realizada a partir dos coeficientes de contração e expansão, os quais foram identificados como parâmetros mais sensíveis para o caso estudado. Os valores recomendados são de 0.18 e 0.84, respectivamente. Ademais, o modelo 1D permitiu estimar as vazões de funcionamento mínima de $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ e máxima de $1.10 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando uma profundidade mínima de 0.50 m e uma taxa de dissipação de energia teórica não superior a $200 \text{ W}/\text{m}^3$. A simulação com o modelo 3D permitiu verificar os padrões de escoamento ao longo da escada de peixes, assim como as regiões mais críticas para a passagem dos peixes. O padrão de velocidades nos tanques da escada é composto de duas regiões principais: de jato, com alta velocidade e energia cinética turbulenta; e de recirculação, que serve para o descanso dos peixes. As velocidades encontradas nas ranhuras não são superiores às velocidades suportadas pelos peixes das espécies-chave deste estudo. Ressalta-se que a taxa de dissipação de energia teórica, tradicionalmente utilizada na literatura para avaliar as condições hidráulicas em escadas de peixes, não possui boa concordância com as simulações 3D, podendo ser utilizada como uma primeira aproximação, mais conservadora, da energia dissipada. Apesar dos modelos conseguirem simular os níveis d'água, as velocidades simuladas foram diferentes das velocidades observadas no modelo em escala reduzida. Mais estudos devem ser realizados para verificar os efeitos de escala da turbulência.

Palavras-chave: eco-hidráulica, migração de peixes, dinâmica dos fluidos computacional.

ABSTRACT

This work analyzed the hydraulic behavior of a vertical slot type fishway using uni and tridimensional modeling. The results were compared with experimental data obtained in a bench-scale model (1:12). Water levels simulated in the 1D and 3D models were very close to the water levels obtained from the bench-scale model and had a mean difference of $\pm 0:04$ m. The 1D model was calibrated with expansion and contraction coefficients, which were identified as the most sensitive parameters for this case studied. The recommended values are 0.18 and 0.84, respectively. Furthermore, the 1D model allowed to estimate the minimum operating flow rates from $0.12 \text{ m}^3 / \text{s}$ and maximum $1.10 \text{ m}^3 / \text{s}$, considering a minimum depth of 0.50 m and a rate of theoretical energy dissipation not exceeding 200 W/m^3 . The simulation with the 3D model verified the flow patterns along the fishway as well as the most critical regions for the fish passage. The velocity pattern in the tanks of the ladder consists of two main regions: the jet with high velocity and turbulent kinetic energy; and recirculation, which serves as an area for the fish to rest. The velocities found in the slots are not higher than the velocities supported by the key fish species in this study. It is noteworthy that the rate of theoretical energy dissipation, traditionally used in the literature to evaluate the hydraulic conditions in fishways, does not have good agreement with the 3D simulations and can be used as a first approximation, more conservative, of the dissipated energy. Even though the models had similar water levels, the simulated velocities were different than the velocities observed in the bench-scale model. More studies should be performed to verify the scale effects of turbulence.

Keywords: ecohydraulic, fish migration, computational fluid dynamics.

1. Introdução

A hidroeletricidade é uma forma de obtenção de energia elétrica a partir da conversão da energia hidráulica de rios. É uma fonte de energia considerada limpa, renovável e com baixos custos operacionais. De acordo com o *Renewables Global Futures Report* (2013), as hidrelétricas possuem uma tecnologia já bem desenvolvida e com grandes avanços no desempenho e custo, apresentando projeções de investimento crescentes no mercado de energias renováveis. No entanto, um dos grandes impactos da construção de hidrelétricas está relacionado à construção das barragens e dos seus efeitos na ictiofauna da região. Os efeitos negativos aos peixes compreendem, entre outros, a interferência no deslocamento dos peixes tanto para jusante quanto para montante, a mortalidade dos peixes ao passar pelas turbinas e a alteração das características da água, como temperatura e oxigênio dissolvido.

As barragens de usinas hidrelétricas são apenas uma das várias formas de intervenção por parte dos seres humanos nos cursos naturais de água, porém, a construção dessas barragens pode ter profundas implicações para a região. As barragens causam a inundação de grandes áreas, a fragmentação dos rios, alteram seus cursos naturais, afetam o ambiente e as características da água, interferindo assim no ciclo de vida das comunidades aquáticas existentes na região.

Uma medida adotada para a mitigação dos efeitos do bloqueio exercido pelas barragens sobre as espécies de peixes migratórias é a implantação de sistemas para transposição de peixes (STP). Os STP são estruturas hidráulicas utilizadas na dissipação de energia para permitir condições favoráveis de escoamento para os peixes transporem a barragem de forma eficiente. Normalmente, os STP são uma forma de permitir a movimentação dos peixes de jusante para montante da barragem e podem ser de vários tipos, como escadas, eclusas ou elevadores (Lopes e Silva, 2012). No entanto, Martins (2000) pondera que os STP devem contemplar o movimento dinâmico de migração dos peixes, tanto no sentido para montante como para jusante da barragem. Quando os STP não são corretamente projetados e construídos, eles podem dificultar a passagem dos peixes, em ambos os sentidos da barragem, e até mesmo, se a sua construção for equivocada, podem se tornar armadilhas ecológicas (Pelicice e Agostinho, 2008).

Na América do Norte e Europa, os STP para passagem à montante são considerados uma tecnologia bem desenvolvida para algumas espécies de peixes anádromas (peixes que se reproduzem em água doce e crescem em água salgada) (Larinier, 2000). Em relação à

passagem de peixes para jusante, as tecnologias são muito menos avançadas e necessitam ser mais estudadas, uma vez que o desenvolvimento de meios eficazes para a migração a jusante é mais complexa (Larinier e Travade, 2002). No Brasil, a maioria das espécies de peixes migratórias são potamódromas (peixes que completam seu ciclo de vida em águas doces), e possuem grande interesse comercial e recreativo (Godinho e Kynard, 2009). Porém, ainda há certo desconhecimento da ictiofauna de água doce brasileira, onde um dos principais fatores é o fato da extensa rede de drenagem e com muitos ambientes pouco amostrados (Magalhães et al., 2006), além da grande biodiversidade de peixes existentes no país.

O princípio geral dos STP para a passagem a montante é atrair os peixes migrantes para um ponto específico a jusante da barragem e fazer com que eles passem ativa ou passivamente para montante (Larinier, 2000). Segundo Soares (2012), a eficácia dos STP está associada à capacidade desses dispositivos em atrair os peixes, pois primeiramente, os peixes devem encontrar facilmente a entrada. Dessa forma, é necessário ter o conhecimento de determinados aspectos do comportamento das espécies migratórias que irão utilizar o mecanismo e das condições hidrodinâmicas junto à entrada dessas estruturas.

Assim, a eficácia dos STP está diretamente ligada às velocidades de água e aos padrões de escoamento nessa estrutura. As características hidráulicas devem ser compatíveis com a capacidade natatória e comportamento das espécies alvo. Algumas espécies de peixes são muito sensíveis a determinadas condições de escoamento, como diferenças no nível de água entre tanques, aeração ou turbulência excessiva, existência de grandes vórtices e velocidades muito baixas que podem agir como barreiras para os peixes. Além dos fatores hidráulicos, os peixes são sensíveis a outros fatores ambientais (como o nível de oxigênio dissolvido, temperatura, ruído, luz e odor), que podem ter o efeito de impedir a passagem desses peixes (Larinier, 2000).

As escadas de peixes geralmente consistem em um canal inclinado dividido por diferentes barreiras com aberturas para os peixes nadarem. Os dispositivos presentes dentro do canal atuam hidráulicamente em conjunto para produzir condições de escoamento favoráveis para que os peixes possam nadar. Vários tipos de escadas para peixes têm sido desenvolvidas e normalmente são identificadas pela disposição dessas barreiras dentro do canal. Embora existam diversas variações dentro de cada tipo de escada para peixes, estas podem ser classificadas em ranhura vertical, tanques com vertedouro, Denil e bueiro (Katopodis, 1992).

Segundo Katopodis e Williams (2012), os primeiros esforços consolidados com base científica para o desenvolvimento de escadas para peixes, destinadas aos peixes que migram

sentido montante, começaram no início da primeira década de 1900 na Europa, seguido pela América do Norte na década de 40, com testes em campo e laboratório de diferentes modelos de escadas para peixes. Na década de 50, iniciaram os testes com base científica para configurações de escadas para peixes destinadas aos peixes que migram sentido jusante da barragem.

Apesar do crescente número de escadas para peixes sendo construídas no Brasil, o pouco conhecimento sobre o comportamento migratório das espécies de peixes brasileiras tem levado a vários equívocos na implantação dessas estruturas na conservação dos peixes (Godinho e Kynard, 2009).

As escadas de peixes começaram a ser utilizados no Brasil a partir da criação de leis que determinavam a sua construção, mas os projetos não conseguiram levar em consideração as interações entre as suas características técnicas (como o tipo, declividade e vazão) e a natureza da ictiofauna presente (Agostinho et al., 2002). Para Lopes e Silva (2012), a construção dessas estruturas muitas vezes foi decorrente da obrigatoriedade de legislações e não de estudos ecológicos e técnicos que determinassem a necessidade de implantação. Outro fator analisado por Agostinho et al. (2008), é que após a construção dessas estruturas, raramente são feitas avaliações sobre o seu funcionamento, onde a maioria dos estudos existentes é restrito à eficiência da escada em permitir a passagem dos peixes a montante, o que não avalia a eficiência das escadas na conservação dos peixes.

Uma escada de peixes bem projetada e construída deve fornecer aos peixes um caminho que permite o movimento de migração através de barragens ou outros obstáculos, sem atrasos inaceitáveis. Os critérios de projeto e construção das escadas para peixes são direcionados por requisitos biológicos, como o comportamento dos peixes, a motivação, as preferências, o tempo de migração e as habilidades natatórias (Katopodis, 1992). A partir dessas informações, essas estruturas devem ser construídas com as características de escoamento favoráveis para a utilização das espécies de peixes que se pretende atingir.

A eco-hidráulica tem suas raízes no conceito da continuidade do rio, o qual estabelece uma conexão entre os processos abióticos e o ambiente biótico (Vannote et al., 1980). Resulta do princípio de que a estrutura e função dos ecossistemas aquáticos dependem da interação entre processos biológicos, físicos e químicos (Tonina e Jorde, 2013). De acordo com Katopodis (2012), a eco-hidráulica tem como objetivo integrar os conhecimentos e inovações da ecologia e hidráulica para mitigar os impactos de infraestrutura nos recursos hídricos e restaurar ou criar ecossistemas aquáticos. Os tópicos da eco-hidráulica incluem sistemas de passagem para organismos aquáticos (como passagens de peixes), modelagem hidrodinâmica

e do habitat (como regimes de vazão ecológica ou ambiental ou necessidades de vazão ecológica), conservação de ecossistemas aquáticos, restauração ou criação (como restauração do fluxo, substituição de habitat), assim como modificação ou remoção de infraestrutura (por exemplo remoção de barragem).

Assim, modelagem hidráulica se faz uma etapa importante no projeto de escadas de peixes, auxiliando no entendimento das características do escoamento, como diferenças no nível de água entre tanques, velocidades e turbulência, que devem ser observadas para o seu correto dimensionamento, de modo a proporcionar condições de escoamento dentro dos padrões necessários para as espécies de peixes que irão utilizar o mecanismo e não submeter os indivíduos a condições além das quais eles são capazes de superar.

A modelagem física é o método de pesquisa mais bem fundamentado em estudos hidráulicos, onde seus resultados representam o processo modelado de maneira bastante confiável (Girgidov, 2010). No entanto, a modelagem física durante toda a fase de um projeto possui altos custos construtivos e operacionais, além de exigirem grandes espaços e instalações prediais, o que pode tornar o projeto inviável. Já a modelagem numérica computacional é considerada mais simples de ser executada e possui custos reduzidos em relação ao método físico. Ela pode ser realizada em fases preliminares do projeto ou até mesmo para testar e melhorar a eficiência de estruturas já construídas. Por meio da modelagem numérica é possível analisar com maior facilidade, e de maneira eficiente, os efeitos das variações das características geométricas e de diferentes vazões nos padrões de escoamento, permitindo uma avaliação das condições de passagem dos peixes de acordo com suas capacidades biológicas (por exemplo em Puertas et al., 2012; Feurich et al., 2012). No entanto, apenas após um processo de validação do modelo numérico que o projeto de estruturas hidráulicas pode se basear nas previsões fornecidas por meio de suas simulações. A validação do modelo consiste na comparação dos resultados obtidos através de simulações com dados obtidos experimentalmente. Sendo assim, a simulação numérica precisa ser verificada utilizando dados empíricos para a calibração de seus resultados.

Com a modelagem híbrida, são utilizados modelos físicos e numéricos. A partir do modelo físico são coletados todos os parâmetros do modelo que poderão ser utilizados para a modelagem numérica. Assim, são realizadas as simulações numéricas e seus resultados são calibrados com base nos dados obtidos com o modelo físico. Uma vez que o modelo numérico esteja calibrado ele deverá fornecer os parâmetros hidráulicos e características do modelo físico com certa acurácia, permitindo que futuros estudos sejam desenvolvidos sem a necessidade de nova modelagem física (Girgidov, 2010).

A partir da modelagem física de STP são analisadas as variações de condições do escoamento para diferentes estruturas e operações hidráulicas, obtendo-se parâmetros que poderão ser utilizados para a aferição de modelos computacionais (Martins e Tamada, 2000). Entre os métodos numéricos computacionais existem os mais simplificados, que fazem simulações unidimensionais (1D), até os mais complexos, capazes de fornecer informações detalhadas do escoamento em até três dimensões (3D).

Estudos experimentais analisaram a estrutura do escoamento em escadas de peixes do tipo ranhura vertical com diferentes arranjos, onde foram observados os padrões do escoamento nas regiões de jato e recirculação dentro dos tanques, assim como relacionaram o comportamento entre vazão e profundidade adimensionais (Rajaratnam et al., 1986, 1992; Wu et al., 1999; Puertas et al., 2004; Liu et al., 2006). Ainda com base em estudos experimentais, foram realizadas análises da turbulência do escoamento por meio da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação de energia em escadas de peixe com ranhuras verticais (Wu et al., 1999; Puertas et al., 2004; Liu et al., 2006; Wang et al., 2010).

Os modelos computacionais 1D são utilizados para estimar a velocidade e a profundidade médias do escoamento em canais ou estruturas hidráulicas, onde eles assumem que o fluxo ocorre em apenas uma direção, geralmente na direção da parte central do canal. Dessa forma, não fornecem informações sobre a distribuição lateral do escoamento. A geometria do canal é representada por seções transversais perpendiculares a direção do fluxo. A velocidade média na seção transversal é calculada a partir da equação da continuidade e os níveis de água são calculados usando uma equação de resistência hidráulica, como a Equação de Manning (Vasquez e Lima, 2009). Alguns modelos hidráulicos podem ser utilizados para a modelagem 1D em canais, tais como o HEC-RAS e MIKE 11. E ainda, há modelos que unem a modelagem hidráulica com a análise da capacidade de passagem dos peixes pelas condições simuladas, como o FishXing, que avalia especificamente os casos para a passagem por bueiros.

Os modelos computacionais 3D simulam o movimento da água em todas as direções do escoamento, capturando com maior precisão as características hidrodinâmicas do escoamento real modelado. Uma técnica empregada para a modelagem 3D está na utilização da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), a qual pode ser descrita como o uso de computadores para produzir informações sobre o comportamento de um fluido em escoamento para determinadas condições (Shaw, 1992). Por meio da técnica CFD, as equações que regem o escoamento de um fluido, como as equações de Navier-Stokes e da continuidade, são discretizadas e resolvidas para cada elemento da malha. Dessa forma é

possível encontrar valores aproximados para as variáveis de interesse em cada ponto do fluido. Por meio da modelagem CFD, não apenas o campo de velocidade médio pode ser investigado, mas também os efeitos do fluxo transiente, os quais possuem influência considerável na utilidade das passagens para peixes (Haselbauer e Martinez, 2010). Com o avanço de computadores de alto desempenho e o desenvolvimento de softwares de CFD mais robustos, a análise através de CFD se torna mais acessível e, se usada corretamente, é capaz de resolver as complexidades do escoamento (Tabbara et al., 2005).

Estudos utilizando modelos 1D para a representação do escoamento em escadas de peixes do tipo ranhura vertical são pouco encontrados, sendo mais comum a análise 1D em outras estruturas para a passagem de peixes, como em bueiros e outros tipos de escadas (por exemplo em Alden, 2006; Keller et al. 2011), apresentando boa concordância dos níveis de água simulados com dados experimentais. Estudos utilizando a técnica CFD foram realizados para a análise mais detalhada do escoamento em escadas de peixes com ranhuras verticais e apresentaram boa concordância com dados experimentais (por exemplo em Khan, 2006; Haselbauer e Martinez, 2010), fornecendo informações importantes sobre a distribuição dos níveis de água e velocidades que facilitam e agilizam a verificação do funcionamento e da eficiência dessas estruturas para a passagem dos peixes, possibilitando assim a proposição de modificações estruturais ou de operação de modo a atender os requisitos biológicos das espécies de peixes alvo.

Por fim, este trabalho tem como objetivos mostrar as capacidades das modelagens numéricas computacional em representar as características do escoamento em escada de peixes do tipo ranhura vertical e ainda, contribuir para o conhecimento relativo às tecnologias para projetos de escadas de peixes, de maneira a fornecer informações para a análise e construção dessas estruturas de modo eficiente. Para isso, as características do escoamento em uma escada de peixes do tipo ranhura vertical foram analisadas por meio de simulações computacionais 1D e 3D. A modelagem 1D foi realizada utilizando o software de modelagem hidráulica HEC-RAS 4.1. Para a modelagem 3D, utilizou-se a técnica CFD, por meio do software Ansys CFX 14.5. Os modelos numéricos 1D e 3D foram calibrados com base em dados obtidos em testes realizados em modelo físico e os resultados foram comparados entre si.

2. Dados sobre a Escada de Peixes Modelada

Os dados da escada de peixes do tipo ranhura vertical apresentados neste trabalho foram cedidos e utilizados com a autorização da *Northwest Hydraulic Consultants* (NHC) e da *Brookfield Renewable Energy*. A NHC construiu e testou um modelo físico em escala 1:12 para o Projeto Hidrelétrico do Rio Kokish (Figura 1), localizado no nordeste da Ilha de Vancouver, Canadá (NHC, 2013). Esse estudo teve como objetivo analisar o desempenho hidráulico da tomada d'água e da escada de peixes, no sentido de aperfeiçoar o projeto dessas estruturas.

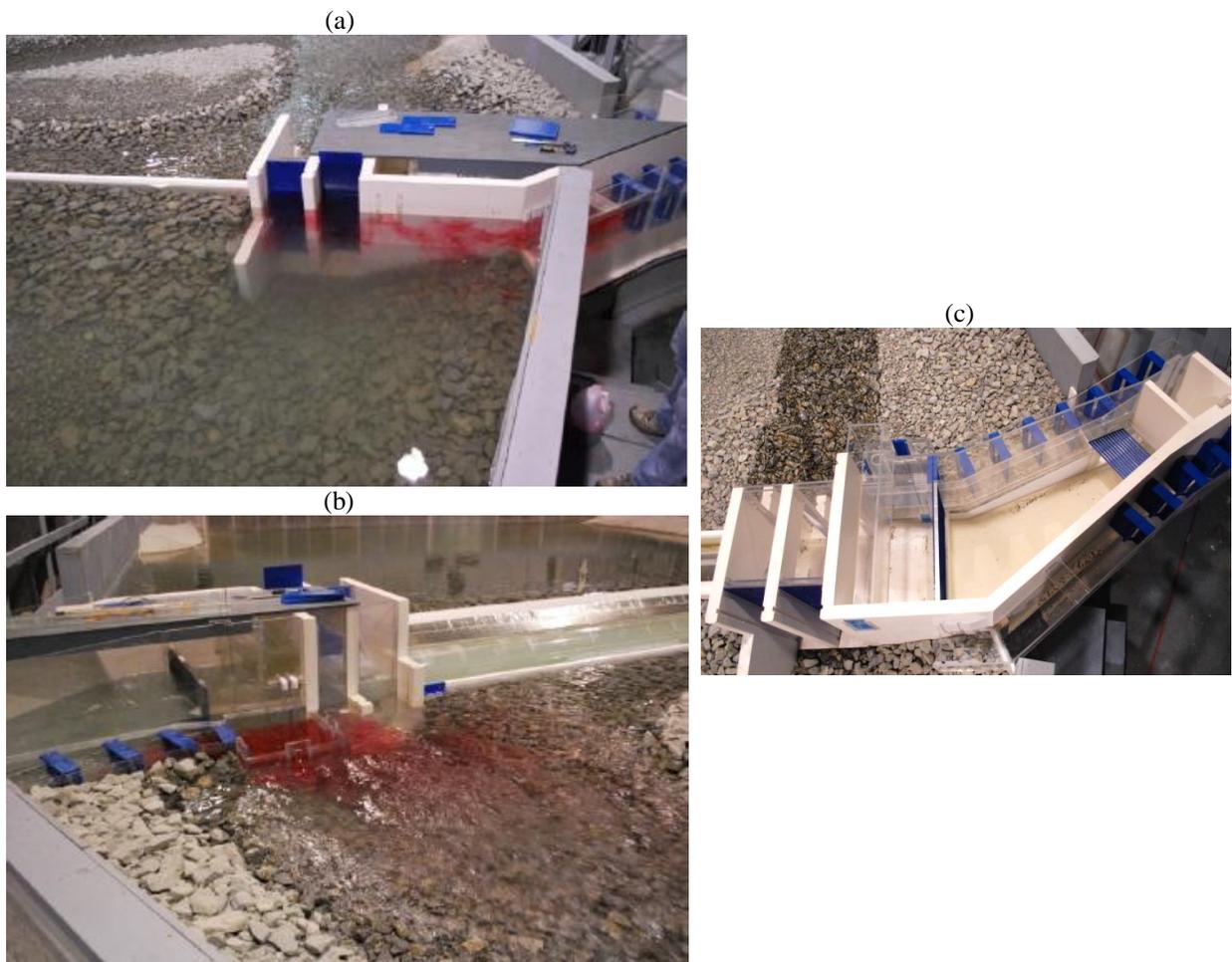


Figura 1. Fotos do modelo físico: (a) Vista com os padrões de escoamento superficial próximo da saída da escada de peixes durante realização de teste; (b) Vista com os padrões de escoamento no tanque de entrada da escada de peixes durante realização de teste; e (c) Vista da escada de peixes em torno da estrutura de admissão.
 Fonte: NHC, 2013.

A partir de testes realizados no modelo hidráulico físico (Figura 1), foram obtidos dados de velocidade, níveis de água e padrões de escoamento em alguns pontos da escada de

peixes (Figura 2) para diferentes vazões. Além disso, foram produzidos fotos e vídeos durante toda a fase de testes, mostrando os padrões de escoamento próximos à tomada d'água. Foi realizado ainda, um teste específico para o desenvolvimento da curva-chave para a escada de peixes, onde foram coletados dados do nível da água, velocidade e vazão no tanque de saída da escada de peixes. Os resultados obtidos com o modelo físico foram utilizados para a calibração das simulações numéricas.

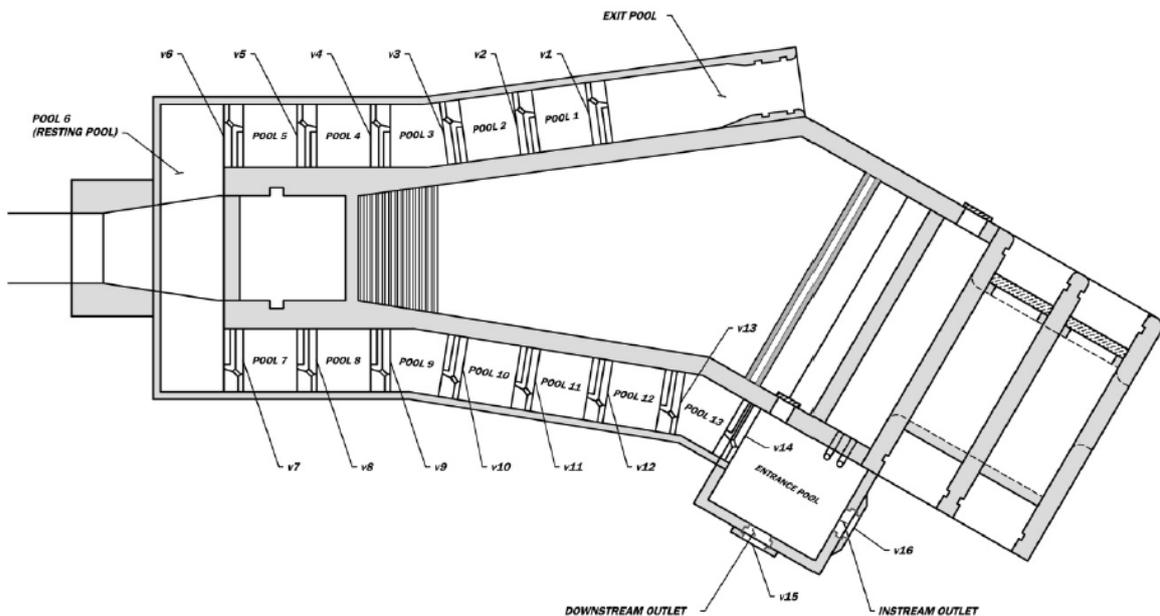


Figura 2. Localização dos pontos de medição de velocidades e identificação dos tanques na configuração final da escada de peixes. Fonte: NHC, 2013.

A escada de peixes do Projeto Hidrelétrico do Rio Kokish possui uma vazão de operação de aproximadamente $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$ e é composta por quatro partes principais: (i) o tanque de entrada, com 5.00 m de largura por 5.80 m de comprimento, localizado a jusante da barragem, com cota de piso na elevação 248.00 m; (ii) o canal de transposição, com cota de piso inicial na elevação 251.00 m. Possui 3.00 m de largura e consiste em 13 tanques, sendo o sexto um tanque de descanso com 13.70 m de comprimento e cota de piso na elevação 253.52 m. Os tanques são conectados por ranhuras de 2.20 m de altura por 0.35 m de largura em paredes defletoras com um degrau de fundo de 0.30 m de altura (Figura 3); (iii) o tanque de saída com 4.55 m de comprimento, que faz a ligação entre a escada e o reservatório, com a cota de piso localizada na elevação 255.20 m; (iv) um sistema de água de atração, composto por duas tubulações que descarregam uma vazão adicional no tanque de entrada. Esse sistema de água auxiliar tem como objetivo aumentar a vazão e velocidades no tanque de entrada e,

com isso, criar condições mais atrativas para os peixes acessarem a escada, sem aumentar a vazão no canal de transposição, o que resultaria em maiores velocidades nos tanques e ranhuras e tornaria as condições menos favoráveis para a passagem dos peixes das espécies-chave para esse projeto. A escada de peixes estudada foi projetada para permitir a passagem de peixes de espécies de salmões. Ao longo desse trabalho, serão avaliadas as condições de passagem especificamente para essas espécies.

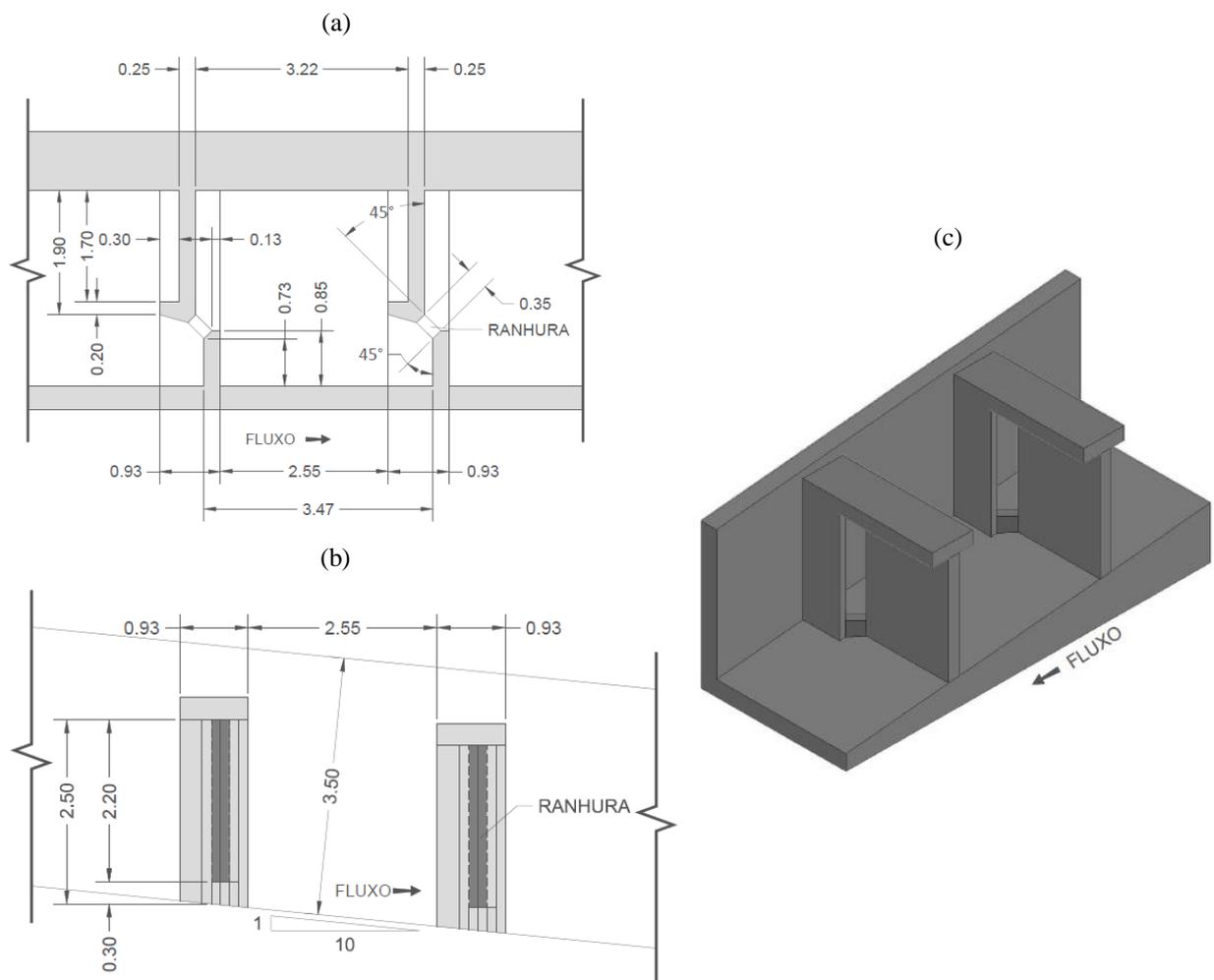


Figura 3. Detalhes da geometria nas ranhuras, com unidades em metros: (a) planta típica, (b) corte típico e (c) vista isométrica. Fonte: Adaptado de NHC (2013).

A principal vantagem de escadas de peixes do tipo ranhura vertical é a sua capacidade de funcionar em uma grande faixa de níveis d'água (Katopodis, 1992). Esse tipo de escada possibilita que os peixes nadem através das ranhuras na profundidade de sua preferência, permitindo a passagem de diferentes espécies de peixes. A primeira escada de peixes do tipo ranhura vertical foi construída no Canadá, e desde então, seu projeto tem sido adotado de modo geral ao redor do mundo (Rodríguez et al., 2006), assim como no Brasil.

3. Modelagem Unidimensional do Escoamento em Escada de Peixe do Tipo Ranhura Vertical

Neste capítulo são apresentados os procedimentos numéricos, os resultados e as conclusões da modelagem numérica 1D do escoamento da escada de peixes do tipo ranhura vertical.

3.1. HEC-RAS

A modelagem computacional foi realizada utilizando o software livre HEC-RAS 4.1 (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers*. A aplicação do HEC-RAS seguiu os seguintes passos:

3.1.1. Equações Governantes

O HEC-RAS é uma ferramenta que utiliza métodos numéricos e algoritmos para solucionar numericamente a equação discretizada da energia (Equação de Bernoulli) para canais em uma dimensão:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

onde Y_1 e Y_2 são, respectivamente, as profundidades médias nas seções 1 e 2; Z_1 e Z_2 são, respectivamente, as cotas do fundo do canal em relação a uma referência nas seções 1 e 2; V_1 e V_2 são, respectivamente, as velocidades médias nas seções 1 e 2; α_1 e α_2 são, respectivamente, os coeficientes de Coriolis nas seções 1 e 2; g é a aceleração da gravidade; h_e é a perda de carga no trecho; L é o comprimento do trecho ponderado pela vazão; \bar{S}_f é a perda de carga unitária representativa do trecho; e C é o coeficiente de perda de carga por contração ou expansão.

Para a análise de escoamento permanente, primeiramente deve-se entrar com os dados de geometria, onde o canal é representado por meio de seções transversais perpendiculares a direção do fluxo e são determinadas informações sobre o canal e os coeficientes de perda de

energia. Após os dados de geometria, devem ser definidos o número de perfis a serem calculados, os dados de vazão para cada trecho do rio e cada perfil, e as condições de contorno consideradas. As condições de contorno são necessárias para estabelecer o nível de água inicial nas extremidades, montante e jusante, do sistema, para que então o programa comece a resolver as equações. Para um fluxo em regime subcrítico, é preciso atribuir condições de contorno apenas nas extremidades a jusante no sistema. Em um fluxo em regime supercrítico, condições de contorno são necessárias apenas a montante. No caso de um escoamento em regime misto, então as condições de contorno deverão ser definidas tanto nas extremidades a montante e jusante do sistema.

O procedimento computacional é o seguinte (HEC, 2010):

- I) Assume-se um determinado nível de água ($WS_1 = Y_1 + Z_1$) na seção a montante;
- II) Baseado no nível de água assumido é determinado a condutância total e a carga de velocidade correspondente. A condutância, K , é a medida da capacidade de transporte de uma seção do canal e pode ser representada com base na Equação de Manning:

$$K = \frac{Q}{\sqrt{S_f}} = \frac{1}{n} \times A \times R^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

$$Q = V \times A \quad (4)$$

onde Q é a vazão, S_f é a perda de carga unitária na seção, n é o coeficiente de rugosidade de Manning, V é a velocidade média, A é a área hidráulica da seção transversal e R é o raio hidráulico;

- III) Com os valores do passo II, é calculado \bar{S}_f e a equação 2 é resolvida para h_e ;
- IV) Com os valores dos passos II e III, a equação 1 é resolvida para o nível de água WS_2 ;
- V) O valor calculado de WS_2 é comparado com o valor assumido de WS_1 no passo I. Então os passos I até o V são repetidos até os valores atingirem uma diferença inferior a 0.003 m.

Maiores informações sobre os métodos numéricos e algoritmos utilizados pelo programa podem ser encontradas no Manual de Referência Hidráulico do HEC-RAS (HEC, 2010).

3.1.2. Definição do Domínio Computacional e Condições de Contorno

O domínio computacional das simulações da escada de peixes do presente estudo foi baseado na escada de peixes do Projeto Hidrelétrico do Rio Kokish (Figura 2), conforme descrito no item 2. No entanto, algumas simplificações na geometria foram necessárias para adaptá-la ao modelo 1D. Na Figura 4, está representada a geometria simplificada utilizada no HEC-RAS. A geometria consiste em um canal inclinado com 3.00 m de largura, apresentando: (i) o tanque de entrada com aproximadamente 4.38 m de comprimento; (ii) o canal de transposição, composto por 12 tanques com 3.50 m de comprimento e um tanque de descanso com comprimento de 14.63 m. As ranhuras conectando os tanques foram representadas com 3.50 m de altura e 0.35 m de largura, possuindo um degrau de fundo com 0.30 m de altura; (iv) e o tanque de saída com 4.55 m de comprimento, que faz a ligação.

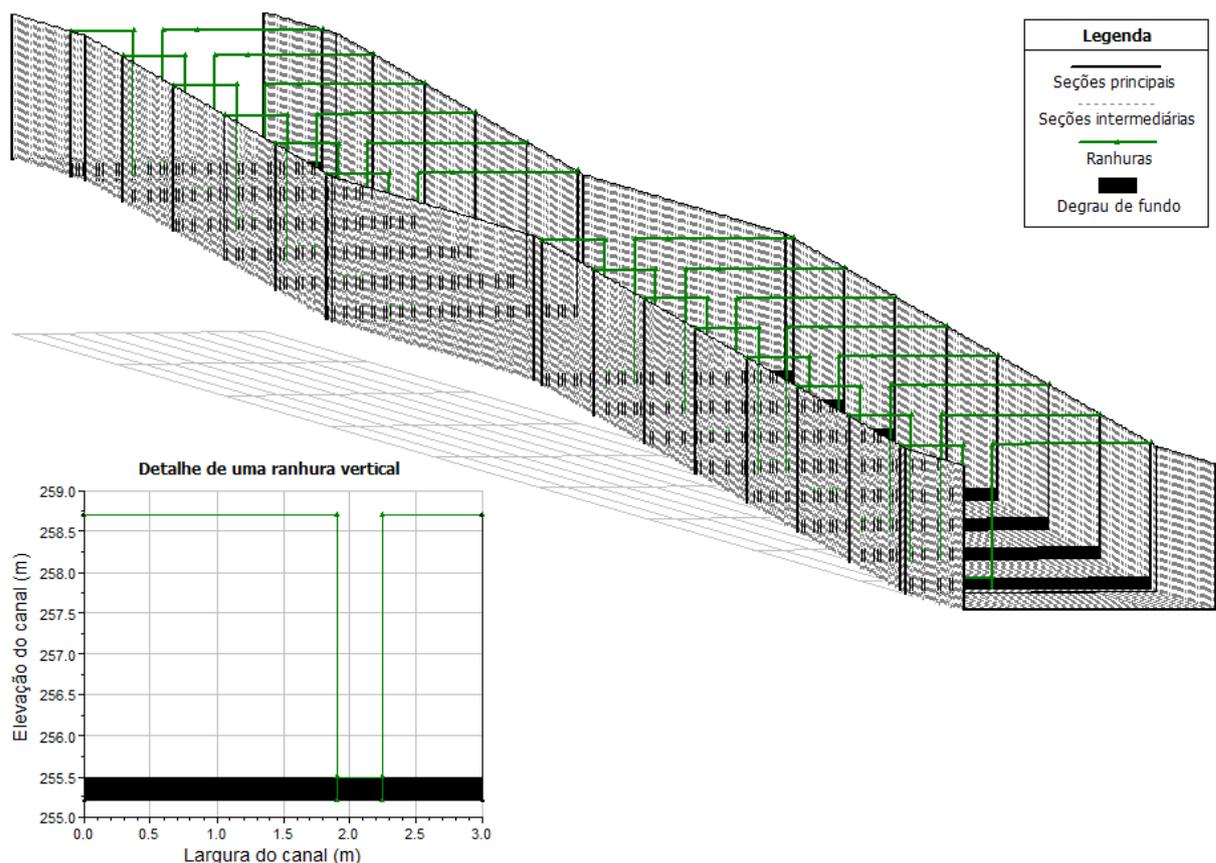


Figura 4. Perspectiva em três dimensões da geometria simplificada da escada de peixes, com detalhe de uma seção com ranhura vertical.

Uma seção transversal foi criada em cada região onde ocorre o estreitamento da seção, que são nas paredes com a ranhura vertical da escada, e onde há mudança na declividade do

canal. Entre essas seções principais foram interpoladas automaticamente seções intermediárias a cada 0.10 m, criando assim um perfil d'água mais detalhado ao longo da escada. Imediatamente a montante e a jusante do estreitamento da seção nas paredes com a ranhura vertical ocorrem regiões de recirculação. Essas regiões foram consideradas como “inefetivas” para o transporte de água. Portanto, nessas regiões somente ocorre o acúmulo de água. Os degraus foram representados como “obstruções”, sendo áreas bloqueadas que diminuem a área do escoamento. O coeficiente de Manning foi definido como constante em todo canal e igual a 0.013, encontrado na literatura como o indicado para canais de concreto (Chow, 1973).

Como ocorre um regime de escoamento misto na escada de peixes, onde há a ocorrência de escoamento subcrítico à montante das ranhuras ($Fr < 1$; Fr é o número adimensional Froude) e nas ranhuras escoamento crítico ($Fr = 1$) e supercrítico ($Fr > 1$), as condições de contorno, tanto à montante quanto à jusante, foram definidas com o nível de água conhecido para cada perfil simulado (Tabela 1). Os coeficientes de contração e expansão foram definidos conforme descrito no item a seguir.

Tabela 1. Condições de contorno definidas.

Perfil	Nível de água conhecido (m)	
	Montante	Jusante
C1	257.70	252.90
C2	257.70	253.50
C3	257.70	253.70

3.1.3. Calibração do Modelo

Para a calibração do modelo numérico foram utilizados dados de níveis de água obtidos a partir de experimentos realizados pela NHC no modelo físico em escala 1:12 do Projeto Hidrelétrico do Rio Kokish, localizado no nordeste da Ilha de Vancouver, Canadá (NHC, 2013). Foram utilizados dados de níveis de água e padrões de escoamento em alguns pontos da escada de peixes (Figura 2). A calibração foi realizada a partir da comparação dos resultados simulados no HEC-RAS para três vazões de calibração ($C1 = 1.52 \text{ m}^3/\text{s}$; $C2 = 1.86 \text{ m}^3/\text{s}$; $C3 = 1.95 \text{ m}^3/\text{s}$) com os valores observados no modelo físico.

A sensibilidade dos resultados do modelo para variações na rugosidade do canal e na vazão foi analisada. Para isso, o número de Manning de $n = 0.013$, foi variado $\pm 0.2n$, nas três vazões de calibração. Foi verificado que não houve influência nos resultados dos níveis de

água estimados para essas variações. Por essa razão, foi adotado o valor de $n = 0.013$ em todas as simulações.

Por se tratar de uma região na qual ocorre uma grande variação de energia e da profundidade, os coeficientes de contração e expansão foram considerados fatores determinantes para a estimativa acurada do nível de água nos tanques da escada. Assim, esses coeficientes foram escolhidos para a calibração do modelo numérico, sendo utilizado um planejamento experimental 2^2 , ou seja, com dois fatores variando em dois níveis, o que resultou em um total de quatro simulações por ciclo realizado. Vale a pena ressaltar que o planejamento experimental permite não somente obter a influência principal dos coeficientes de contração e de expansão, mas também a interação entre esses coeficientes (ver Montgomery, 1997, por exemplo).

Foram realizados quatro ciclos de cálculos. Ao final de cada ciclo obtinha-se um direcionamento para a determinação dos novos valores dos coeficientes que seriam adotados para o próximo ciclo, a fim de encontrar os menores erros entre os níveis de água simulados no HEC-RAS e os medidos no modelo físico. Esse processo resultou na localização da região com os menores erros. Nessa região, foram realizadas diversas simulações para a determinação mais precisa dos valores dos coeficientes de contração e expansão.

Para a avaliação do erro entre os modelos físico e computacional, o erro foi calculado através do método do Erro Médio Absoluto (EMA):

$$EMA = \sum_{i=1}^N \frac{|(y_p - y_m)_i|}{N} \quad (4)$$

onde y_p são os valores dos níveis de água preditos ou simulados, y_m são os valores medidos e N é o número total de valores. A equação 4 é recomendada por Willmott e Matsuura (2005) para a realização de avaliações dimensionadas e comparações do erro médio do desempenho de um modelo.

Assim, os níveis de água simulados nas seções situadas aproximadamente no centro de cada tanque da escada foram utilizados para o cálculo do EMA, obtendo-se um valor do erro para cada vazão de calibração (Tabela 2). Com uma média simples do EMA das três vazões de calibração, foi calculado um erro médio do modelo, para determinado coeficiente de contração e de expansão (Tabela 2). Dessa forma, os modelos com diferentes valores dos coeficientes foram comparados por meio desse erro médio.

3.2. Resultados e Discussão

A Figura 5 apresenta o resultado do planejamento fatorial 2^2 , onde o erro médio do modelo para os níveis de água, encontrado para diferentes valores dos coeficientes de contração e expansão, é mostrado nos pontos para cada um dos quatro ciclos realizados.

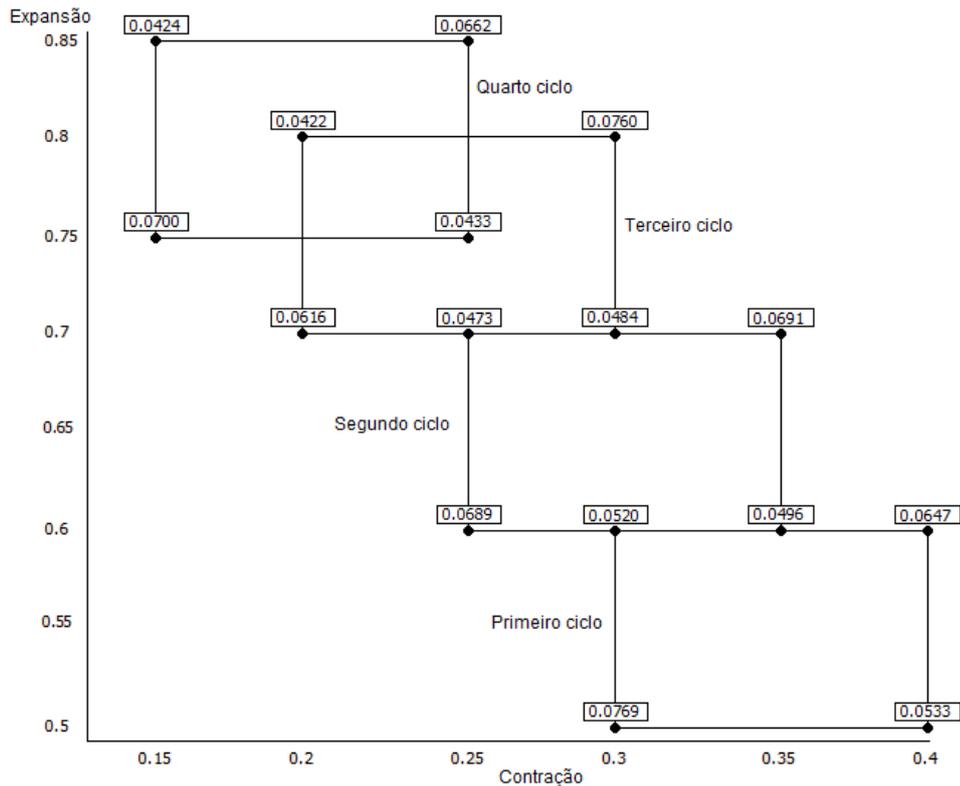


Figura 5. Quatro ciclos (total de 16 simulações) do planejamento fatorial 2^2 , onde é possível localizar a região com os menores erros médios.

As quatro simulações do primeiro ciclo do planejamento indicam que o resultado com o menor erro médio do modelo ocorre para coeficiente de contração igual a 0.30 e coeficiente de expansão igual a 0.60. O segundo ciclo de simulações foi direcionado para a região de menor erro médio, conforme mostra a Figura 5. O mesmo procedimento foi adotado nos terceiro e quarto ciclos seguintes. O quarto ciclo aponta para o fato que o menor valor do erro médio está localizado na região compreendida entre os valores de 0.15 a 0.25 para o coeficiente de contração, e entre 0.75 a 0.85 para o coeficiente de expansão. Conforme dito na seção 3.1.3, essa região foi analisada mais detalhadamente através da realização de novas simulações. A Figura 6 mostra o diagrama de Pareto para os quatro ciclos do planejamento fatorial com os valores absolutos do efeito da interação entre os coeficientes de contração e de expansão, do efeito principal do coeficiente de contração e do efeito principal do coeficiente

de expansão. Ademais, há uma linha no diagrama que serve como referência para os efeitos que são significativos, considerando uma significância $\alpha = 0.1$. É possível observar que a interação entre os coeficientes de contração e de expansão é o efeito mais importante no erro médio. Para alguns ciclos, o efeito da interação entre os coeficientes de expansão e de contração é significativo. Neste caso, a variação no erro não é somente decorrente a variações aleatórias, mas devido a interação entre os coeficientes. Em outras palavras, o efeito do coeficiente de contração depende dos níveis do coeficiente de expansão. Os efeitos principais dos coeficientes de contração e de expansão não são tão importantes.

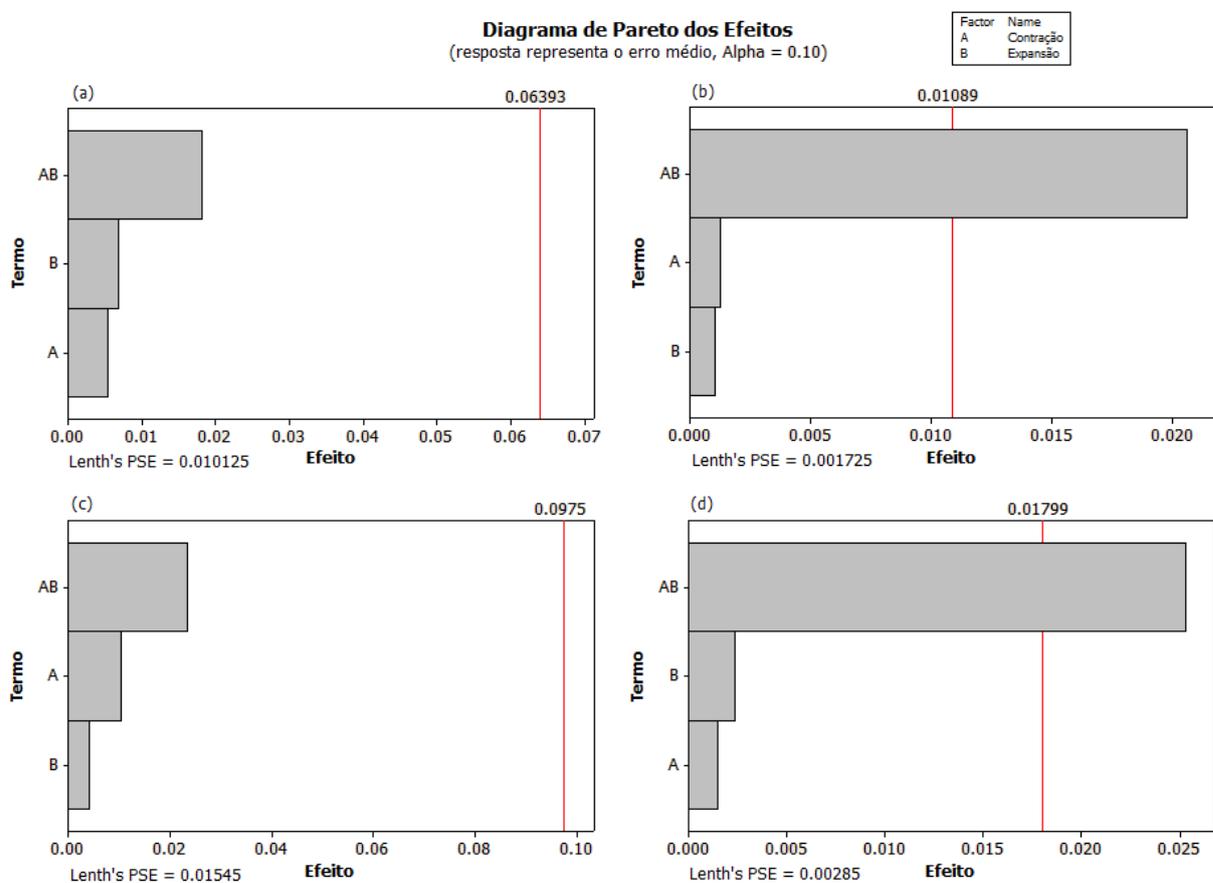


Figura 6. Diagrama de Pareto para os quatro ciclos do planejamento fatorial: primeiro ciclo (a), segundo ciclo (b), terceiro ciclo (c) e quarto ciclo (d). O diagrama mostra o valor absoluto dos efeitos da interação entre os coeficientes de contração e de expansão (AB), o efeito principal do coeficiente de contração (A) e o efeito principal do coeficiente de expansão (B). Ademais, há uma linha no diagrama que serve como referência para os efeitos que são significativos, considerando uma significância $\alpha = 0.1$.

A Figura 7 e a Tabela 2 apresenta os EMA calculados em função dos coeficientes de contração e expansão para as diferentes vazões de calibração e do erro médio das três vazões. As cores dos pontos na Figura 7 indicam a magnitude do erro no nível d'água. Todos os

pontos que possuem a mesma cor possuem o mesmo erro. Note que o conjunto de pontos que possui erro mínimo (cor avermelhada) forma aproximadamente uma linha reta. Ademais, as “linhas de contorno” aproximadamente paralelas à linha de erro mínimo indicam erros crescentes no nível d’água em ambos os lados da linha de mínimo. Observa-se também que as “linhas de mínimo” de cada vazão estão localizadas em posições levemente distintas. Finalmente, é possível notar que a ordem de grandeza do erro para as vazões C1 e C3 é aproximadamente igual. A vazão C2 apresenta erros menores quando comparada às vazões C1 e C3.

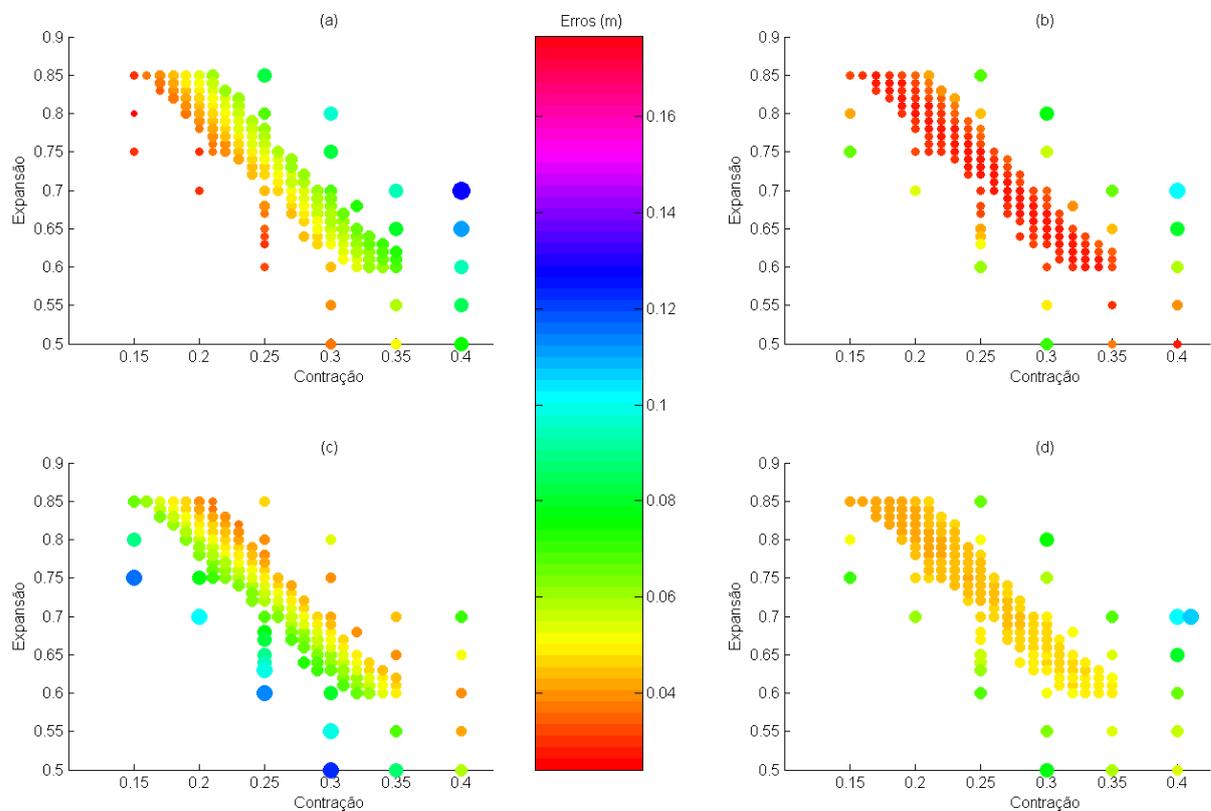


Figura 7. Gráfico com a distribuição dos EMA calculados para as variações dos coeficientes de contração e expansão nas vazões de calibração C1 (a), C2 (b) e C3 (c) e do erro médio das três vazões (d). As cores dos pontos indicam a magnitude do erro no nível d’água (ver legenda).

Tabela 2. Calibração do modelo com os coeficientes de contração e expansão de 0.18 e 0.84, respectivamente.

Local (distância no canal, em m)	Níveis de água observados (m)			Níveis de água simulados (m)			Erro absoluto (m)		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Tanque de saída (63.28)	257.70	258.08	258.20	257.64	258.04	258.14	0.06	0.04	0.06
Tanque 1 (58.20)	257.36	257.76	257.90	257.34	257.74	257.84	0.02	0.02	0.06
Tanque 2 (55.25)	256.99	257.37	257.55	257.01	257.41	257.51	0.02	0.04	0.04
Tanque 3 (51.89)	256.64	257.08	257.20	256.69	257.09	257.19	0.05	0.01	0.01
Tanque 4 (48.42)	256.34	256.74	256.92	256.38	256.78	256.89	0.04	0.04	0.03
Tanque 5 (45.05)	256.03	256.45	256.51	256.10	256.49	256.59	0.07	0.04	0.08
Tanque de descanso (36.19)	255.80	256.15	256.30	255.84	256.22	256.32	0.04	0.07	0.02
Tanque 7 (27.06)	255.47	255.89	256.01	255.49	255.88	255.98	0.02	0.01	0.03
Tanque 8 (24.09)	255.10	255.54	255.66	255.14	255.53	255.64	0.04	0.01	0.02
Tanque 9 (20.03)	254.72	255.14	255.38	254.79	255.19	255.30	0.07	0.05	0.08
Tanque 10 (16.56)	254.37	254.85	255.03	254.44	254.84	254.96	0.07	0.01	0.07
Tanque 11 (13.09)	254.02	254.50	254.74	254.08	254.50	254.63	0.06	0.00	0.11
Tanque 12 (9.62)	253.68	254.22	254.42	253.72	254.16	254.31	0.04	0.06	0.11
Tanque 13 (6.16)	253.30	253.85	254.05	253.34	253.83	254.00	0.04	0.02	0.05
Tanque de entrada (2.30)	252.90	253.50	253.70	252.90	253.50	253.70	0.00	0.00	0.00
EMA (m)							0.0427	0.0280	0.0513
Erro médio (m)							0.0407		

A Figura 8 apresenta um diagrama de caixa com os seguintes valores para as três vazões: mínimo, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil e valor máximo. A maioria dos erros está entre 0.01 e 0.08 m. A vazão C2 apresenta menor variabilidade dos erros, enquanto que a vazão C3 apresenta a maior variabilidade dos erros. O maior erro absoluto foi obtido para a vazão C3, nos tanques 11 e 12, e foi igual a 0.11 m (ver Tabela 2), enquanto que o menor erro absoluto, no qual o valor simulado foi igual ao medido, foi obtido no tanque 11, para C2, e no tanque de entrada, para as três vazões. O menor erro médio foi de 0.0407 m, para coeficientes de contração e de expansão iguais a 0.18 e 0.84, respectivamente. O erro médio é de aproximadamente 0.04 m.

Os valores obtidos para os coeficientes de contração e expansão concordam com as recomendações de (Hunt e Brunner, 1995) que o valor mínimo para o coeficiente de contração deve ser igual a 0.10 e que o coeficiente de expansão não deve ser menor do que o coeficiente de contração. Entretanto, ainda assim os valores dos coeficientes são diferentes daqueles usualmente adotados na modelagem de escoamentos onde ocorre o estreitamento da seção, como no caso de pontes. Essa diferença pode ser explicada devido às particularidades existentes em uma escada de peixes com ranhuras verticais, tais como a inclinação da escada de 1:10, bem superior aos valores normalmente encontrados em canais e trechos com pontes.

Os valores obtidos para o erro global no nível d'água são bons, uma vez que a incerteza da medição do nível de água é de 0.05 m. Ademais, os valores obtidos no presente estudo são melhores que os obtidos em outros estudos. (Hunt e Brunner, 1995), por exemplo, obteve valor de 0.07 ao investigar eventos de cheia em locais com pontes.

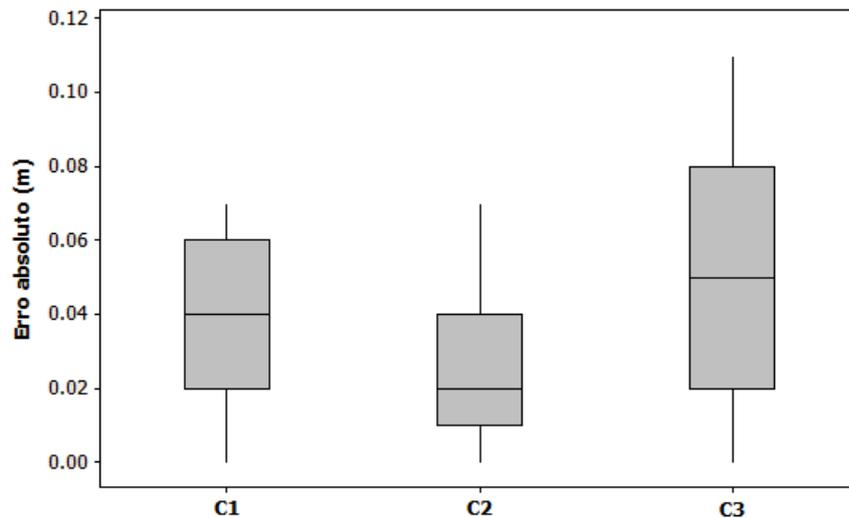


Figura 8. Distribuição do erro absoluto em cada vazão de calibração. A linha horizontal superior de cada retângulo representa o terceiro quartil, a segunda linha representa a mediana e a linha horizontal inferior representa o primeiro quartil. As linhas verticais indicam os valores máximos e mínimos do erro.

O perfil d'água na escada, para as vazões de calibração, pode ser observado na Figura 9. Conhecer o perfil d'água em escadas de peixes é importante para analisar se os desníveis entre tanques estão dentro do limite que permite a passagem dos peixes. Clay (1993) sugere quedas de 0.50 m entre tanques como satisfatório. Altas quedas d'água podem ser um fator limitante para certas espécies de peixes atravessarem com sucesso a escada. Na Figura 9 é possível observar que os perfis simulados apresentam padrões semelhantes ao encontrado no modelo físico. O maior desnível simulado foi igual a 0.44 m e foi encontrado do tanque 13 para o tanque de entrada.

Na Tabela 3 estão apresentadas as velocidades simuladas nas seções das ranhuras, para as três vazões de calibração. Elas são comparadas com as velocidades medidas experimentalmente no modelo físico. As velocidades simuladas no modelo HEC-RAS foram menores do que as velocidades medidas no modelo físico, apresentando uma diferença de até 41%. Isso pode ser explicado pelo fato de que a modelagem 1D fornece apenas a velocidade média na seção de interesse, enquanto que a medição da velocidade no modelo físico foi pontual e realizada na região do jato que sai da ranhura vertical. Desse modo, o modelo 1D não é capaz de fornecer a velocidade pontual que foi medida no modelo físico.

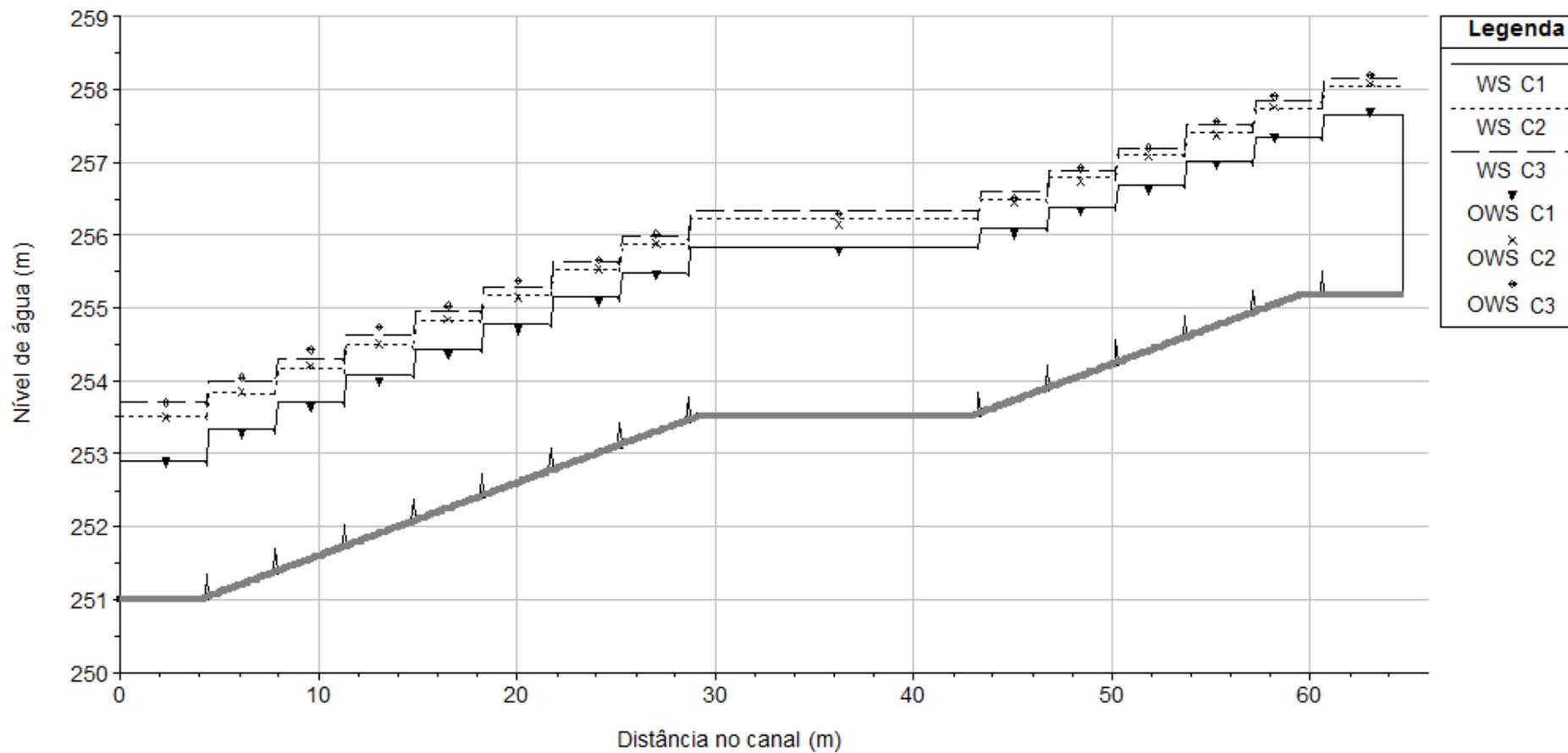


Figura 9. Perfil dos níveis de água simulados (WS) e valores observados (OWS) para as vazões de calibração.

Tabela 3. Verificação das velocidades simuladas com as medidas no modelo físico.

Localização (distância no canal em m)	Velocidade medida (m/s)			Velocidade simulada (m/s)			Erro percentual (%)		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
v1 (61.00)	4.1	3.4	3.4	2.4	2.4	2.4	41	29	29
v2 (57.50)	3.5	3.5	3.5	2.5	2.5	2.5	29	29	29
v3 (54.00)	3.7	3.4	3.4	2.5	2.5	2.5	32	26	26
v4 (50.50)	3.5	3.5	3.5	2.4	2.4	2.4	31	31	31
v5 (47.00)	3.7	3.4	3.4	2.4	2.4	2.4	38	29	29
v6 (43.50)	3.6	3.2	3.2	2.2	2.3	2.3	39	28	28
v7 (28.87)	4.1	4.0	4.0	2.6	2.6	2.6	37	35	35
v8 (25.37)	3.6	3.4	3.4	2.6	2.6	2.6	28	24	24
v9 (21.87)	3.7	3.8	3.8	2.6	2.6	2.6	30	32	32
v10 (18.38)	3.5	3.6	3.6	2.6	2.6	2.6	26	28	31
v11 (14.88)	3.7	3.5	3.5	2.6	2.6	2.5	30	26	29
v12 (11.38)	3.9	3.6	3.6	2.7	2.6	2.5	31	28	31
v13 (7.88)	3.6	3.6	3.6	2.7	2.6	2.5	25	31	31
v14 (4.38)	3.8	3.3	3.3	2.9	2.5	2.4	24	24	27

A Figura 10 apresenta a profundidade como função da vazão no tanque de saída da escada de peixes (a curva-chave) de forma dimensional. São mostrados tantos os dados simulados quanto os dados experimentais. Note que há uma excelente concordância entre dados simulados e experimentais, sendo encontrado o EMA de 0.04 m. A Figura 11 mostra a profundidade adimensional, $Y^*=Y_m/b$, em função da vazão adimensional Q^* , sugerida por Rajaratnam et al. (1986):

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

onde g é a gravidade; S_0 é a declividade, podendo ser calculada como o desnível de água entre tanques pelo comprimento do tanque ($\Delta h/L$); e b é a largura da abertura da ranhura. Essa relação foi calculada para todos os tanques, exceto para os tanques de descanso e saída. Pode-se observar que todos os perfis ajustam muito bem a uma única curva, indicando que os parâmetros utilizados por Rajaratnam et al. (1986) para adimensionalização da profundidade e da vazão são convenientes. A equação $Y_m/b = 0.2347Q^* + 1.2493$, obtida a partir de regressão, se ajusta muito bem aos dados.

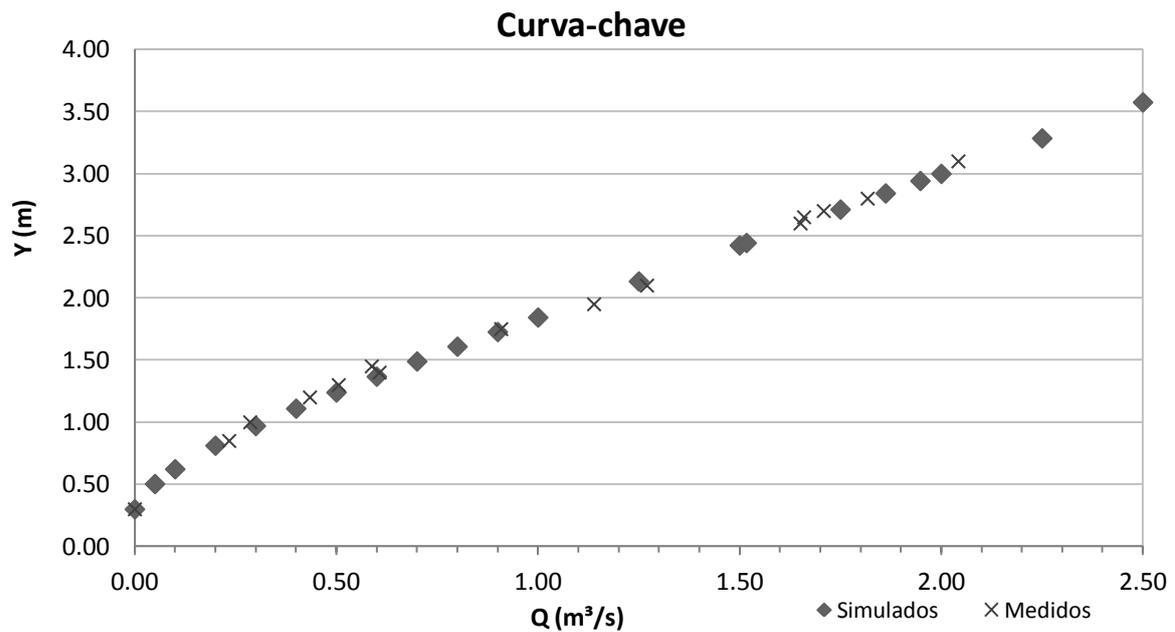


Figura 10. Variação da profundidade em função da vazão no tanque de saída da escada de peixes (Curva-chave):
 (♦) Simulação HEC-RAS, (X) Modelo físico.

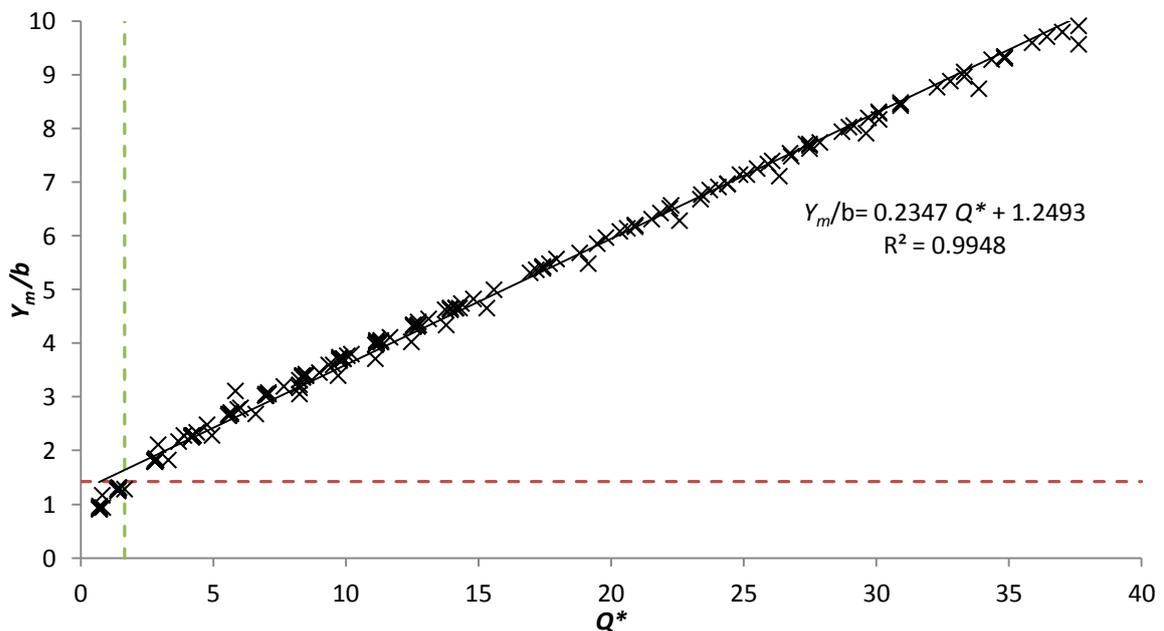


Figura 11. Relação da vazão adimensional (Q^*) e profundidade adimensional (Y_m/b) nos tanques da escada de peixes. As linhas tracejadas na horizontal e na vertical representam, respectivamente, a profundidade adimensional mínima exigida para a passagem de peixes e a vazão adimensional mínima necessária para atender a condição de profundidade.

É importante aqui ressaltar que os peixes necessitam de uma profundidade mínima do escoamento para que possam atingir o seu potencial natatório (Dane, 1978). A submersão

total dos peixes elimina a possibilidade de morte dos peixes pela falta de oxigênio, permite os peixes adquirirem confiança máxima e diminui o risco de lesões em seus corpos através de contato com o fundo da escada. Requerimentos específicos de profundidade variam com as espécies e estágio de vida. Para o salmão, usualmente é adotada a profundidade mínima de 0.50 m; para a truta, a profundidade mínima é de 0.40 m (Teijeiro et al., 2006). Neste estudo, uma profundidade de 0.50 m será adotada como a mínima aceitável. Essa profundidade mínima é apresentada de forma adimensional na Figura 11 através da linha pontilhada vermelha. A partir dessa profundidade mínima é possível obter o valor da vazão adimensional mínima. No presente estudo, a escada deve funcionar com uma vazão superior a 0.12 m³/s para garantir que em todos seus tanques a altura d'água seja de pelo menos 0.50 m.

A eficiência da escada de peixes depende também da turbulência e da aeração nos tanques. Um indicador simples desses parâmetros é a taxa de dissipação de energia por unidade de volume, que pode ser calculada conforme segue:

$$E = \frac{\rho g Q \Delta h}{L W Y_m} \quad (6)$$

onde ρ é a massa específica da água; e W é a largura do tanque. Quanto maior é o valor da energia dissipada, maior é a dificuldade para os peixes nadarem. Para projetos de escadas de peixes é usualmente adotado como limite máximo de E os valores de 150 W/m³ e 200 W/m³ para trutas e salmões, respectivamente. A Figura 12 apresenta a taxa de dissipação de energia adimensional $E^* = E/(\rho g^{3/2} b^{1/2} \Delta h/L)$ em função da vazão adimensional Q^* . Adicionalmente, a Figura 12 apresenta também linhas o valor limite de E^* ($= 0.11$) para que a energia dissipada não seja superior a 200 W/m³. Através do limite superior de E^* é possível obter a vazão máxima. Neste estudo, a vazão máxima possível, levando em consideração a taxa de dissipação de energia, é igual a $Q^* 15.3$ ($Q = 1.10$ m³/s). É importante ressaltar que os limites para a máxima energia dissipável foram encontrados para escadas de peixes com características hidráulicas distintas daquelas estudadas neste estudo e que os valores encontrados na literatura podem ser muito conservadores (Liu et al., 2006). Mais estudos são necessários para determinar valores de dissipação de energia para escadas de peixes com ranhuras verticais.

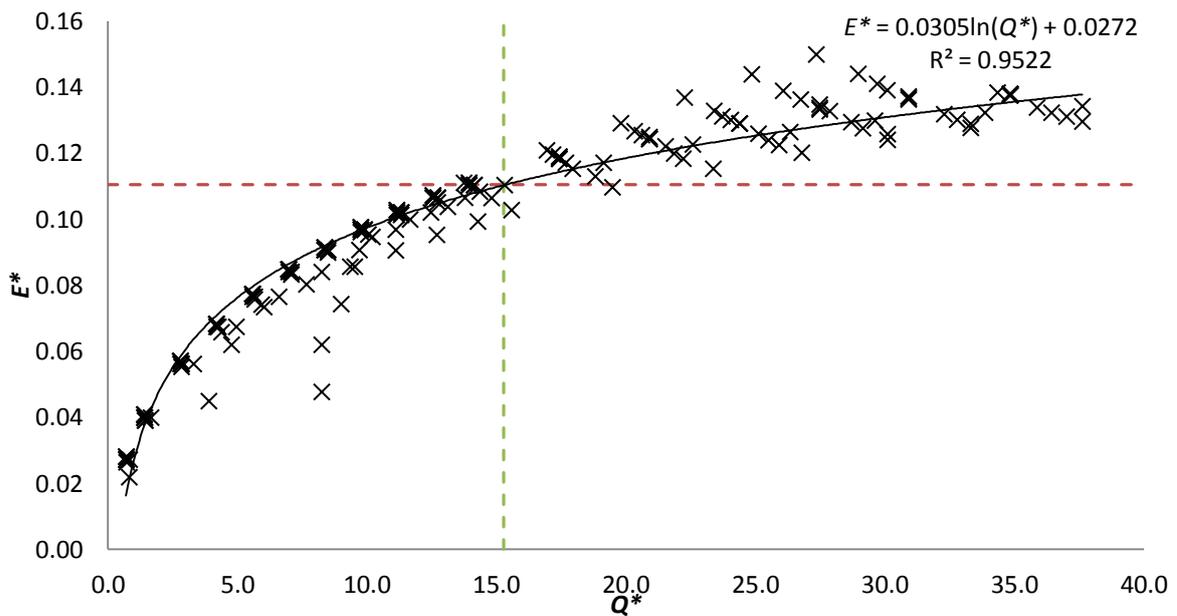


Figura 12. Relação entre a energia dissipada adimensional E^* e a vazão adimensional Q^* . As linhas tracejadas na horizontal e na vertical representam, respectivamente, a energia dissipada adimensional máxima recomendada para a passagem de peixes; e a vazão adimensional máxima necessária para atender a condição de dissipação de energia.

3.3. Comentários Finais sobre o Estudo do Comportamento Hidráulico Utilizando um Modelo 1D

O escoamento em escada de peixe com ranhura vertical foi investigado através do uso de modelagem 1D. Os coeficientes de contração e de expansão foram calibrados usando dados experimentais do nível d'água obtidos pela NHC. A estratégia usada para calibração foi o planejamento fatorial. Ele forneceu informações que permitiram o movimento iterativo rápido para valores menores do erro médio do nível d'água. Ademais, o planejamento fatorial forneceu a informação de que a interação entre os coeficientes de contração e de expansão é mais importante que a os efeitos principais dos coeficientes de contração e de expansão.

Após a calibração do modelo 1D, este forneceu os níveis d'água simulados com boa concordância com os valores experimentais, sendo uma alternativa fácil e rápida para ser utilizada em etapa preliminar de projeto. As simulações do escoamento com os valores calibrados dos coeficientes permitiram a obtenção das vazões mínima ($Q = 0.12 \text{ m}^3/\text{s}$) e máxima ($Q = 1.10 \text{ m}^3/\text{s}$) do escoamento, considerando os critérios de profundidade mínima ($Y_m > 0.50 \text{ m}$) e taxa de dissipação de energia máxima ($E < 200 \text{ W}/\text{m}^3$), para as espécies-chave desse estudo.

No entanto, o modelo 1D não permite estudar os padrões de escoamento na escada de peixes e fornece apenas a velocidade média na seção. Devido as limitações da modelagem 1D, e considerando a importância do conhecimento dos padrões de escoamento e da distribuição das velocidades no interior da escada de peixes, uma modelagem 3D foi realizada para o estudo mais detalhado do escoamento na escada de peixes do tipo ranhura vertical.

4. Modelagem Tridimensional do Escoamento em Escada de Peixes do Tipo Ranhura Vertical

Neste capítulo são apresentados os procedimentos numéricos, os resultados e as conclusões da modelagem numérica 3D do escoamento da escada de peixes do tipo ranhura vertical.

4.1. Dinâmica dos Fluidos Computacional

A modelagem foi realizada utilizando a técnica CFD, por meio do *software* comercial ANSYS CFX 14.5. A aplicação do CFD seguiu os seguintes passos:

4.1.1. Equações Governantes

Considerando escoamento incompressível, permanente e homogêneo, as equações de Navier Stokes em termos médios (RANS, Reynolds Average Navier Stokes) e de conservação de massa são dadas por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (9)$$

onde i ou $j = 1, 2$, ou 3 ; x_1, x_2 , e x_3 , denota as direções do escoamento (x), vertical (y), e transversal (z), respectivamente; u_1, u_2 , e u_3 , são as velocidades medias correspondentes (i.e., $u_1 = u$, $u_2 = v$, e $u_3 = w$); $\overline{u'_i u'_j}$ é a componente das tensões de Reynolds, onde u' denota a parte de flutuação da velocidade; p é a pressão; e ρ é a massa específica. Para o cálculo das tensões de Reynolds, foi utilizada a aproximação de Boussinesq:

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (10)$$

onde μ_t é a viscosidade turbulenta, δ_{ij} é o delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ para $i = j$ e $\delta_{ij} = 0$ para $i \neq j$) e k é a energia cinética turbulenta por unidade de massa, dada por:

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2}) \quad (11)$$

Junto com a aproximação de Boussinesq, a definição de viscosidade turbulenta é utilizada:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

onde c_μ é uma constante empírica e ε é a taxa de dissipação de energia dada pela equação:

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L} \quad (13)$$

onde L é a escala de comprimento. A distribuição de k e ε são calculadas das seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho u_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (15)$$

onde G representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média:

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (16)$$

Os valores das constantes são: $c_\mu = 0.09$, $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ e $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

O código numérico empregado utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações RANS (Equações 8 a 16) em três dimensões. Nesse método, a discretização das equações governantes ocorre, primeiramente, por meio da divisão espacial do domínio em um número arbitrário de volumes de controle, os quais são definidos com base na malha utilizando diferentes esquemas. As equações de conservação são integradas para cada volume de controle, que são utilizados para conservar quantidades relevantes como massa, momento e

energia. Esse método pode ser aplicado em malhas estruturadas e não estruturadas, o que o torna adequado para o tratamento do fluxo em geometrias complexas.

A modelagem da superfície livre, interface entre água e ar, é realizada por meio do método VOF (Volume of Fluid), o qual resolve um conjunto de equações de momento através do domínio, mantendo um registro do volume das duas fases em cada célula computacional. Um maior detalhamento sobre os métodos numéricos e computacionais e a teoria aplicada pelo programa pode ser encontrado no guia de usuário do CFX® (ANSYS, 2012).

4.1.2. Geometria e Malha

O domínio computacional em 3D da escada de peixes (Figura 13) teve como base plantas e cortes da geometria final da escada do Estudo do Modelo Hidráulico Físico do Projeto Hidrelétrico do Rio Kokish. O desenho foi criado em ambiente CAD (*Computer Aided Design*), buscando representar com maior fidelidade possível os detalhes da geometria da escada de peixes, com as dimensões reais, conforme descrito na seção 2.

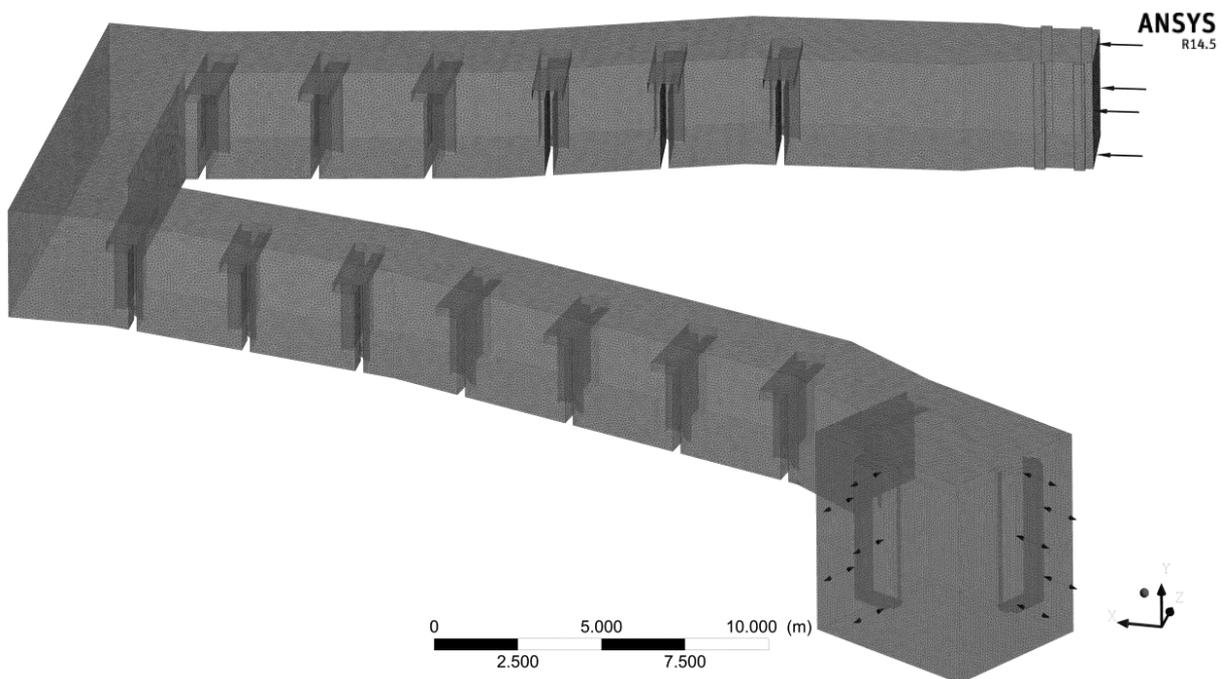


Figura 13. Visão geral do domínio e malha da escada de peixes. As setas, na parte superior da figura, indicam a condição de entrada do escoamento. Na parte inferior, as setas indicam a condição de fronteira aberta, atribuída nos locais por onde os peixes acessam a escada.

Para o processo de geração da malha, no qual ocorre a discretização do domínio em pequenos elementos para os quais as equações que descrevem o movimento são resolvidas, foi utilizado o software ICEM CFD 14.5. Devido à complexidade da geometria, foi gerada uma malha não estruturada, com aproximadamente 1.2×10^7 elementos do tipo tetrahédricos (Figura 13). A partir de um diagnóstico da qualidade da malha, que é baseado no fator de forma dos elementos (relação entre o volume de um elemento e o raio da esfera circunscrita elevado ao cubo, sendo que o valor igual a 1 representa um elemento regular e o valor igual a zero é um elemento com volume zero), verificou-se que 90% dos elementos possuem fator de forma acima de 0.80.

A malha foi mais refinada nas regiões de superfície livre e próximas às ranhuras (Figura 14) visando um maior detalhamento e melhor representação dos fenômenos que lá ocorrem, onde há maiores gradientes de velocidade e de nível d'água. Para o refinamento foi utilizada uma malha adaptativa, isto é, a malha é refinada seletivamente na superfície livre e próximo às ranhuras de acordo com critérios de adaptação especificados. Isso significa que, enquanto a solução do problema é calculada, a malha pode ser refinada em locais onde as variáveis da solução especificadas estão tendo maiores gradientes, com o intuito de resolver mais detalhadamente as características do escoamento nessas regiões. Após esse processo, a malha apresentou um total de aproximadamente 3.3×10^7 elementos.

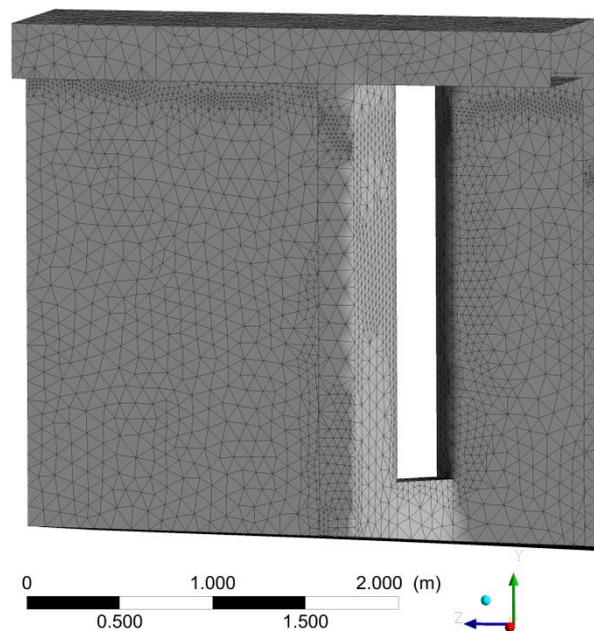


Figura 14. Detalhe da malha na região da ranhura, após o refinamento.

4.1.3. Condições de Contorno e Iniciais

Condições de contorno específicas foram definidas nas fronteiras do domínio (Figura 13). Na saída da escada de peixes, extremidade de montante da escada, foi definida condição de entrada com velocidade uniforme igual a 0.25 m/s. Dessa forma, a vazão de entrada na escada de peixes foi de aproximadamente 1.5 m³/s. As frações em volume de água e de ar foram determinadas por meio da criação de expressões CEL (*CFX Expression Language*). Nas aberturas de acesso para a escada, extremidades mais a jusante, foram definidas condições de fronteiras abertas, permitindo que o escoamento ocorra nos dois sentidos através da superfície de fronteira. Por meio de expressões CEL, foram estabelecidas a pressão estática relativa igual à pressão hidrostática, com direção do escoamento normal a superfície de fronteira, e as frações em volume de água e ar nessas fronteiras. No limite superior da escada também foi aplicada a condição de fronteira aberta, atribuindo uma pressão estática relativa igual a 0 Pa (na opção "*entrainment*", na qual considera o gradiente de velocidade perpendicular à fronteira igual à zero). A fração em volume de ar nessa fronteira foi definida igual a um e a de água igual à zero. A condição de parede com não deslizamento foi utilizada nas ranhuras, paredes e no fundo da escada.

Foi admitido um escoamento em regime permanente, multifásico (com água e ar) no modo homogêneo para superfície livre. O modelo $k-\epsilon$ foi utilizado para descrever a turbulência, o qual utiliza as Equações 8 a 16. Esse modelo já foi utilizado anteriormente em simulações com escada de peixes do tipo ranhura vertical (Khan, 2006; Marriner et al., 2014).

4.2. Resultados e Discussão

A Figura 15 mostra a distribuição de velocidade para as profundidades $y = 0.25h$, $0.5h$ e $0.75h$ (y possui origem no fundo do tanque e aponta para cima). Essas três profundidades representam a altura total da coluna d'água (Silva et al., 2011). É possível observar um jato com alta velocidade escoando da ranhura de montante, atravessando o tanque e colidindo com a parede de jusante. Após "colidir" com a parede, ele se dirige para a ranhura de jusante. Dos dois lados do jato há regiões de recirculação com baixas velocidades. As regiões de recirculação fornecem zonas de descanso para os peixes. As maiores velocidades ocorrem nas ranhuras entre os tanques. Para que o peixe consiga ascender através dos tanques a velocidade máxima do escoamento deve ser menor que a velocidade máxima do peixe. Em outras palavras, o peixe deve possuir uma velocidade de explosão tal que seja maior do que a

velocidade da água (Peake et al, 1997). A velocidade de explosão do salmão (*Chinook*), por exemplo, é de 2.7 a 6.2 m/s (Bell, 1991). Portanto, a velocidade máxima do escoamento não é impeditiva para o deslocamento com velocidade explosiva do salmão. O padrão de escoamento para as diferentes profundidades é similar. A intensidade da velocidade é praticamente constante com a profundidade, com exceção da região localizada no jato de entrada das ranhuras, aumentando levemente com o aumento de y . Portanto, a medição da velocidade em um ponto qualquer ao longo de uma linha vertical fornece uma estimativa confiável da velocidade naquela linha vertical. Ademais, isso também possibilita ao peixe a escolha de qualquer profundidade dentro do tanque. A velocidade vertical y é menor daquela no plano xz . A velocidade vertical descendente máxima está localizada na ranhura de entrada, próximo à superfície, enquanto que a velocidade vertical ascendente máxima está localizada na ranhura de saída, próximo ao degrau no fundo. Na Figura 16 estão representados os vetores velocidade na vertical e o mapa de contorno da intensidade da velocidade típicos em uma seção vertical nas ranhuras, no jato de saída. É possível observar que a intensidade da velocidade possui pequena variação na seção, onde velocidades ligeiramente maiores são encontradas na região à direita na ranhura, em relação ao escoamento.

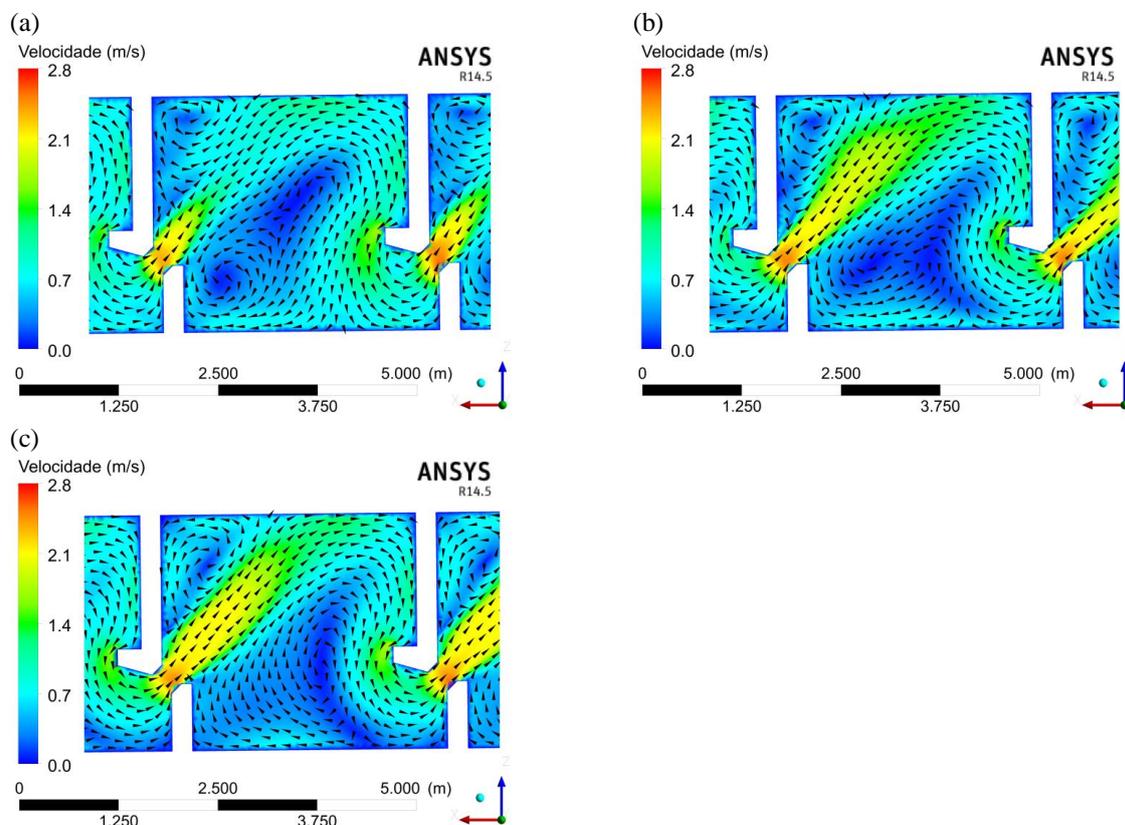


Figura 15. Vetores velocidade e mapa de contorno da intensidade da velocidade para o tanque 8 em (a) $y = 0.25h$, (b) $0.5h$ e (c) $0.75h$.

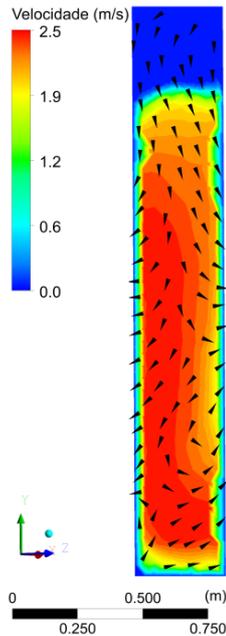


Figura 16. e Vetores velocidade mapa de contorno da intensidade da velocidade na vertical na seção da ranhura, no jato de saída. Maiores velocidades encontradas na região à esquerda na imagem, a qual corresponde, considerando o sentido do escoamento, à direita na ranhura. A região superior em azul está localizado o ar.

A Figura 17 mostra os vetores velocidade e mapa de contorno da intensidade da velocidade na profundidade $0.5h$ entre os tanques 7 e 10. Note que as características do escoamento praticamente não mudam (ver Figura 13). O padrão de escoamento encontrado no presente estudo é similar ao de Wu et al. (1999) e Liu et al. (2006).

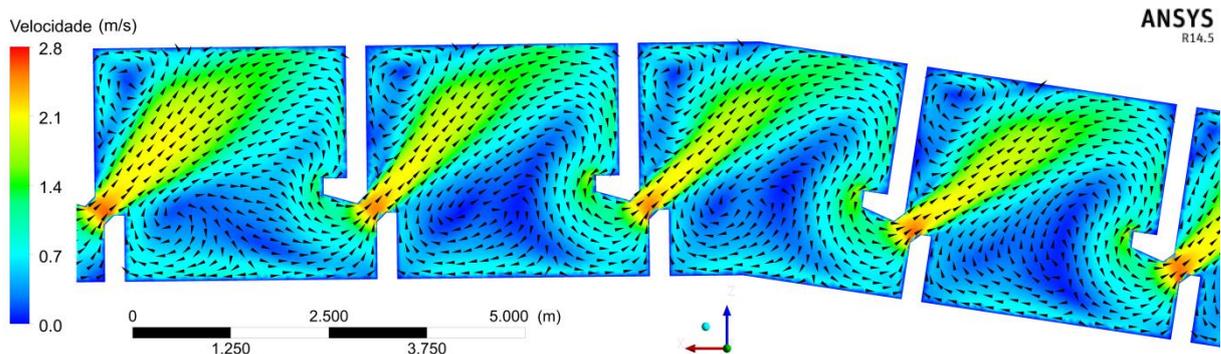


Figura 17. Vetores velocidade e mapa de contorno da intensidade da velocidade na profundidade $0.5h$ para tanques 7 a 10.

A Tabela 4 apresenta as velocidades simuladas e medidas e o erro percentual. As medições no modelo físico foram realizadas utilizando um "*Nixon Miniature Propeller Velocity Probe*" e foram medidas a aproximadamente 75% da profundidade, um pouco abaixo do jato. As velocidades simuladas foram extraídas a partir de planos nas ranhuras, sendo

adotada a velocidade máxima em cada plano. Note que a diferença entre valores experimentais e simulados atinge até 41%. As velocidades simuladas foram consideravelmente mais baixas do que as obtidas no modelo físico. A razão dessa discrepância pode ser devido ao fato de ter sido utilizado um medidor de velocidade 1D, pontual e intrusivo para as medições. Estudos experimentais em escadas de peixes utilizaram velocímetro acústico Doppler para medir a velocidade 3D em uma malha de pontos (ver em Liu et al., 2006; Puertas et al., 2004, Marriner et al., 2014). Ademais, a incerteza da exata posição dos pontos de medição experimentais utilizados no presente estudo também introduz certa dúvida. Entretanto, vale a pena ressaltar que ainda que os dois problemas fossem resolvidos, os valores simulados seriam menores que os experimentais, devido aos efeitos de escala do modelo reduzido. Mais estudos sobre os efeitos de escala na turbulência e nos resultados obtidos em modelos reduzidos de escadas de peixes com ranhuras verticais são necessários, conforme realizado por Calluad (2012). Relativo ao modelo computacional, efeitos da malha e do modelo de turbulência utilizados podem interferir nos resultados, sendo necessários mais estudos para verificar esses aspectos.

Tabela 4. Tabela comparativa das velocidades medidas e simuladas nas regiões das ranhuras.

Localização	Velocidade medida (m/s)	Velocidade simulada (m/s)	Erro percentual (%)
v1	4.1	2.4	41
v2	3.5	2.4	31
v3	3.7	2.4	35
v4	3.5	2.4	31
v5	3.7	2.4	35
v6	3.6	2.4	33
v7	4.1	2.6	37
v8	3.6	2.5	31
v9	3.7	2.6	30
v10	3.5	2.7	23
v11	3.7	2.6	30
v12	3.9	2.6	33
v13	3.6	2.7	25
v14	3.8	2.7	29

As Figuras 18 e 19 apresentam a distribuição da profundidade e de velocidade ao longo da escada e com detalhamento no tanque 8, respectivamente. A Tabela 5 apresenta as alturas d'água simuladas. Os níveis de água simulados foram obtidos por meio da criação de planos transversais em cada tanque da escada, situados de acordo com os locais onde foram

realizadas as medições no modelo físico. Com exceção dos tanques de entrada, de repouso e de saída, o valor do nível de água foi obtido em um plano transversal localizado no centro dos tanques, próximos da margem direita do canal. Nos tanques de saída e de repouso, os níveis de água foram obtidos no centro desses tanques, já no tanque de entrada, o ponto de medição foi obtido próximo da margem direita e da parede com a ranhura (NHC, 2013). É possível observar que entre o tanque de saída e o tanque 13 a altura d'água variou entre 2.12 e 2.46 m. No tanque de entrada, a profundidade foi de 4.92. Essas profundidades são superiores às profundidades mínimas requeridas para os peixes típicos do rio, como espécies de salmão e trutas, a saber, de 0.50 m para o salmão e 0.40 m para a truta (Teijeiro et al., 2006). Vale a pena ressaltar que os peixes necessitam de uma profundidade mínima do escoamento para que possam atingir o seu potencial natatório (Dane, 1978). A submersão total dos peixes elimina a possibilidade de morte dos peixes pela falta de oxigênio, permite os peixes adquirirem confiança máxima e diminui o risco de lesões em seus corpos através de contato com o fundo da escada. O erro médio absoluto (EMA) para os valores dos níveis, isto é:

$$EMA = \sum_{i=1}^N \frac{|(y_p - y_m)_i|}{N} \quad (4)$$

onde y_p são os valores dos níveis de água simulados, y_m são os valores medidos e N é o número total de valores, foi de aproximadamente 0.05 m (ver Tabela 5). O valor obtido é excelente uma vez que está dentro da incerteza de medição no modelo físico, isto é, 0.05 m.

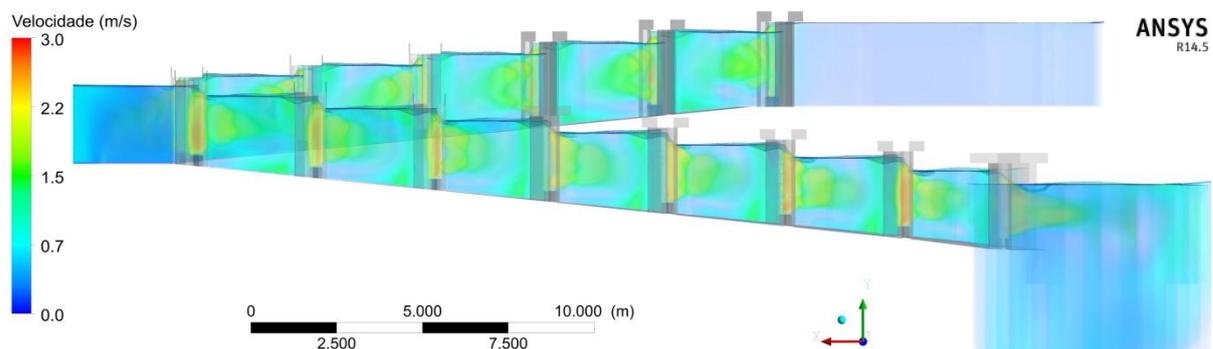


Figura 18. Perfil d'água com a distribuição da velocidade ao longo da escada.

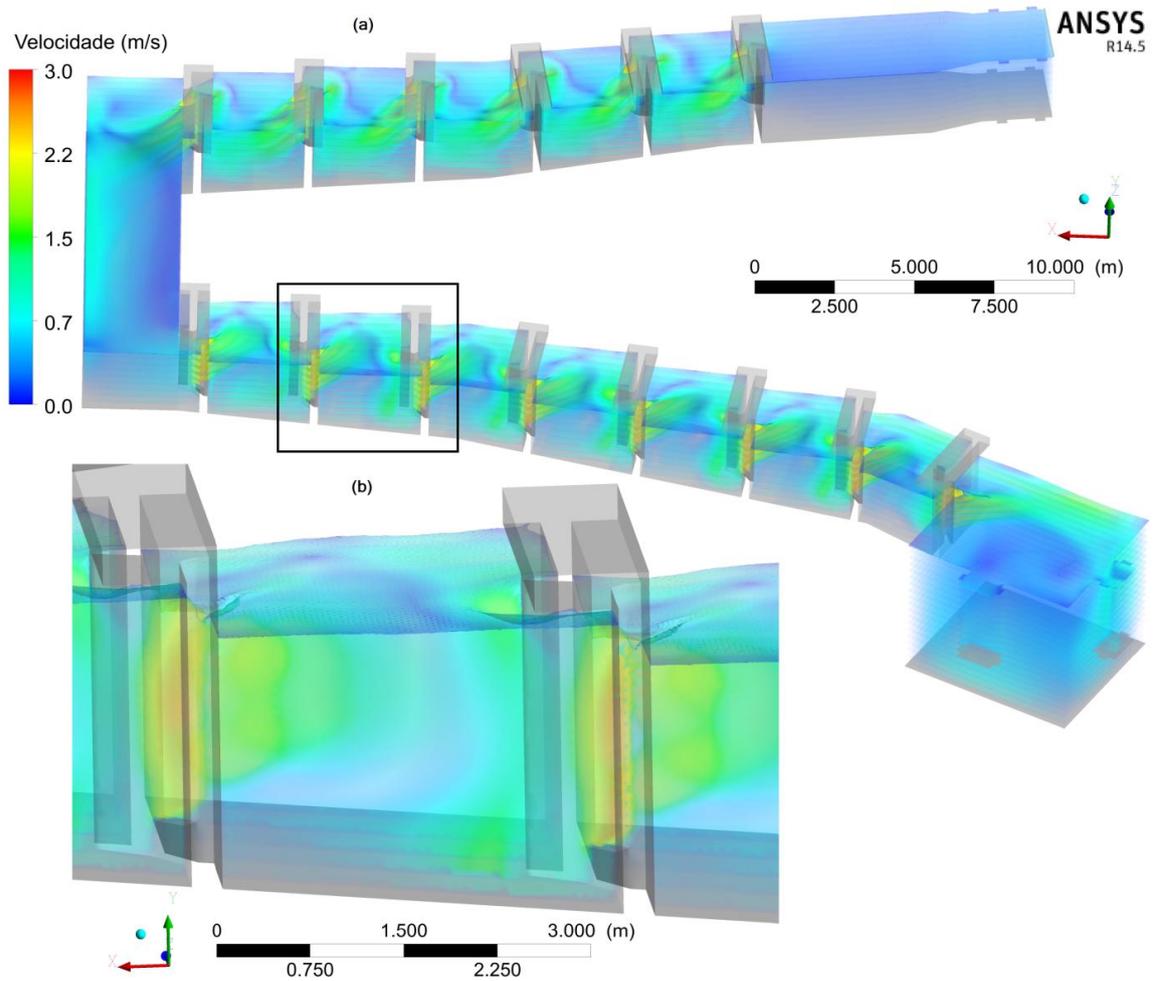


Figura 19. Mapa de contorno da velocidade do escoamento (a) ao longo da escada e (b) no tanque 8.

Tabela 5. Tabela comparativa do níveis e alturas d'água simuladas e medidas.

	Nível de água simulado (m)	Altura d'água simulada (m)	Nível de água medido (m)	Altura d'água medida (m)	Erro absoluto (m)
Tq. de saída	257.66	2.46	257.70	2.50	0.04
Tq.1	257.38	2.26	257.36	2.24	0.02
Tq.2	257.06	2.28	256.99	2.21	0.07
Tq.3	256.73	2.30	256.64	2.21	0.09
Tq.4	256.41	2.33	256.34	2.26	0.07
Tq.5	256.10	2.36	256.03	2.29	0.07
Tq. de descanso	255.80	2.28	255.80	2.28	0.00
Tq.7	255.50	2.20	255.47	2.17	0.03
Tq.8	255.14	2.19	255.10	2.15	0.04
Tq.9	254.78	2.18	254.72	2.12	0.06
Tq.10	254.44	2.18	254.37	2.11	0.07
Tq.11	254.07	2.16	254.02	2.11	0.05
Tq.12	253.68	2.12	253.68	2.12	0.00
Tq.13	253.38	2.16	253.30	2.08	0.08
Tq. de entrada	252.92	4.92	252.90	4.90	0.02
				EMA (m)	0.0473

A Figura 20 apresenta a distribuição típica de energia cinética turbulenta no interior do tanque. A energia cinética turbulenta é alta ($k > 0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$) no jato e na fronteira das zonas de recirculação. Nas zonas de recirculação, a energia cinética é alta devido às consideráveis flutuações na velocidade como resultado do movimento do jato (Wang et al., 2010). No restante do tanque, k é baixa ($k \leq 0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$) (Silva et al., 2012). O comportamento e os valores de k encontrados no presente estudo são similares aos observados nos trabalhos de Liu et al. (2006) e Marriner et al. (2014). Vale a pena ressaltar que os peixes sentem a turbulência através da superfície do seu corpo (Dijkgraaf, 1963). Usualmente eles tendem a evitar turbulência mais elevada (Olla e Davis, 1990), pois ela diminui a velocidade crítica dos peixes, isto é, a velocidade máxima que eles podem se sustentar em um escoamento. O gasto de energia é maior para peixes que procuram manter sua posição em escoamentos turbulentos, pois tais escoamentos possuem maior energia cinética (Olla e Davis, 1990; Enders et al., 2003, 2005). Finalmente, o tempo de trânsito no interior da escada de peixe está negativamente correlacionado ao nível de energia cinética turbulenta (Silva et al., 2012). Portanto, a turbulência pode ser impeditiva para a entrada ou passagem dos peixes através da escada. Entretanto, para a vazão simulada no presente estudo, a turbulência não parece ser um empecilho para a passagem dos peixes.

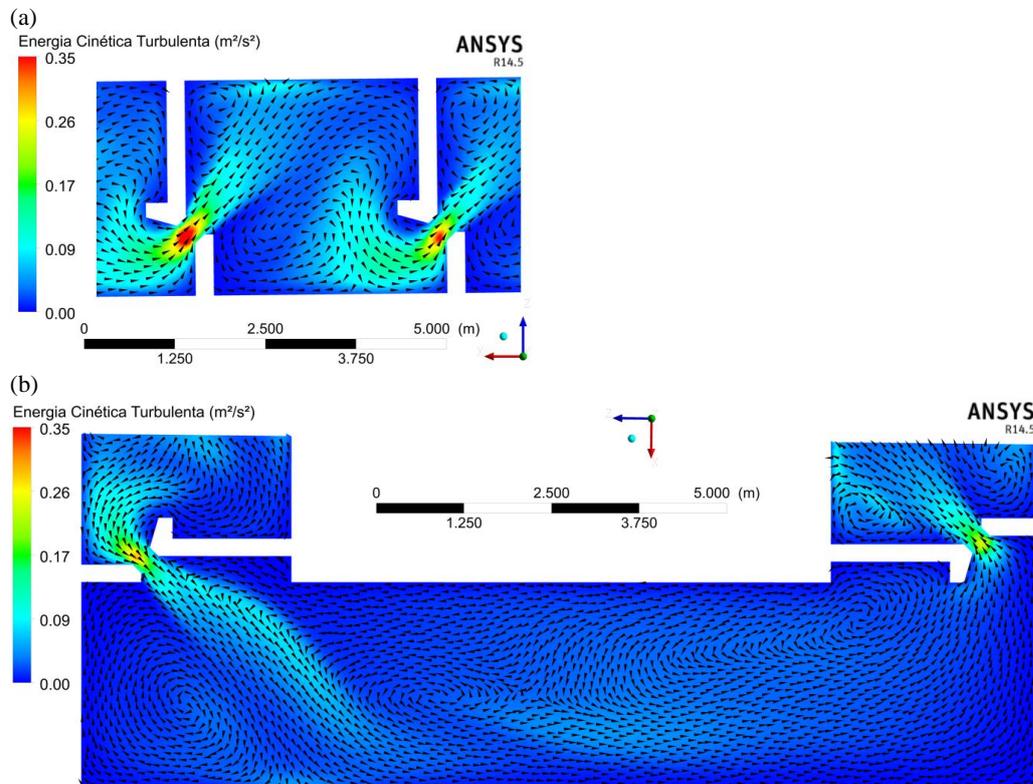


Figura 20. Vetores velocidade e mapa de contorno da energia cinética turbulenta para $y = 0.5h$: (a) tanque n° 8, (b) tanque de descanso. As regiões em vermelho possuem valores iguais ou superiores a $0.35 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

A Figura 21 mostra a distribuição da taxa de dissipação de energia para $y = 0.5h$. A taxa de dissipação de energia é maior nas ranhuras e nas fronteiras do jato e das regiões de recirculação. A maior parte do tanque possui uma taxa de dissipação de energia inferior a 200 W/m^3 . A taxa de dissipação de energia média simulada nos tanques do canal de transposição em uma profundidade de $0.5h$ é de 98 W/m^3 . No tanque de descanso, por exemplo, é igual a 41 W/m^3 . Já no tanque 13 é 162 W/m^3 . A taxa de dissipação de energia por unidade de volume média teórica em um tanque é definida como:

$$E = \frac{\rho g Q \Delta h}{L W Y_m} \quad (17)$$

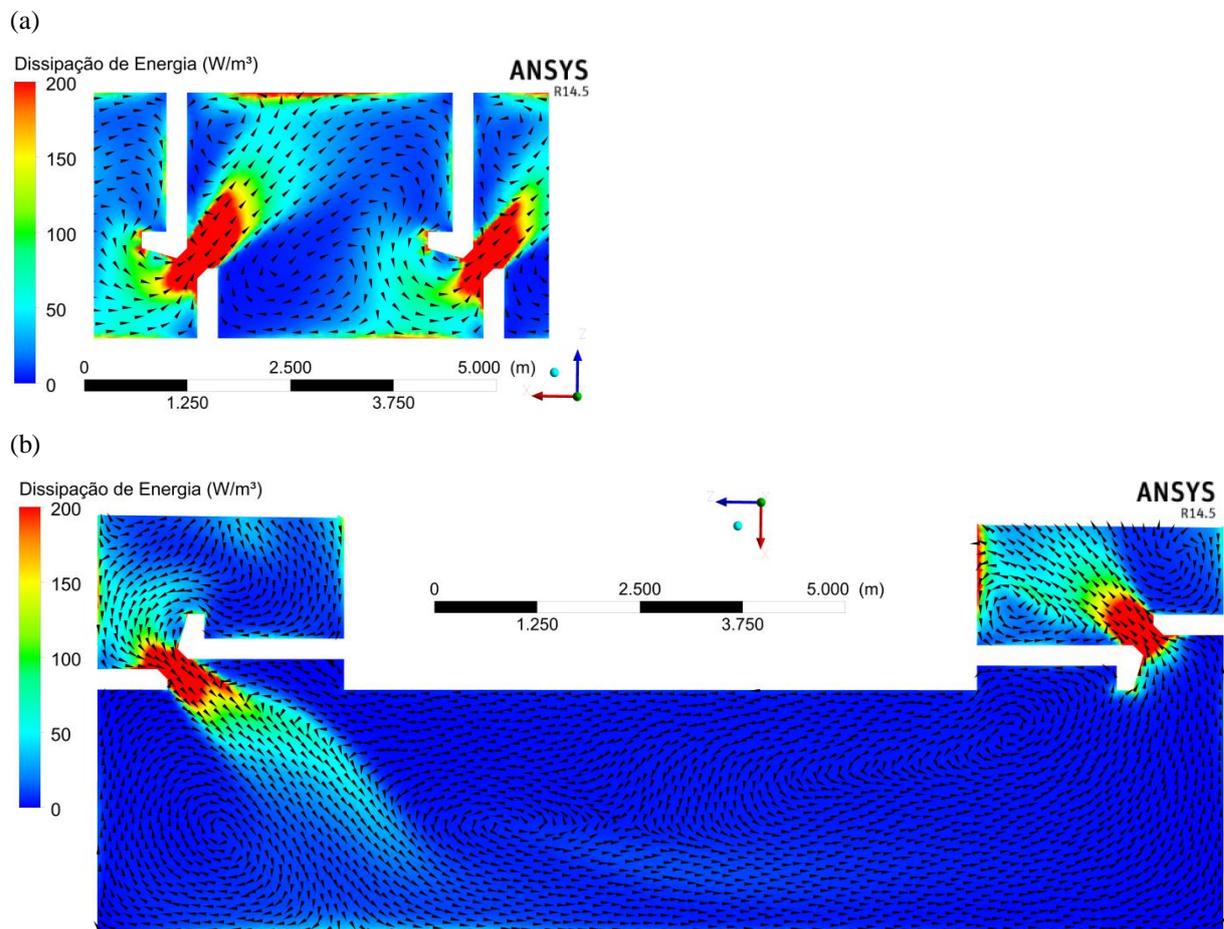


Figura 21. Vetores velocidade e mapa de contorno da taxa de dissipação de energia para $y = 0.5h$: (a) tanque nº 8, (b) tanque de descanso. As regiões em vermelho possuem valores iguais ou superiores a 200 W/m^3 .

A taxa de dissipação de energia média teórica nos tanques do canal de transposição é de 215 W/m^3 . No tanque de descanso é de 49 W/m^3 e no tanque 13, onde foi encontrado o maior valor teórico, é de 273 W/m^3 . Comparando esses valores com os valores médios

simulados, há uma diferença de 54% para o valor médio nos tanques do canal de transposição, 16% no tanque de descanso e 41% no tanque 13. Com exceção do valor médio nos tanques do canal de transposição, esses resultados concordam com a discrepância de 8 a 50% encontrada por Liu et al. (2006). Em modelo 2D de escada de peixes com ranhura vertical, Chorda et al. (2010) obteve valores simulados da taxa de dissipação de energia até 31% menores do que o valor teórico. Essas diferenças entre valores da taxa de dissipação de energia média teórica e simulada podem indicar uma superestimação por parte da equação teórica, uma vez que ela utiliza apenas o desnível entre tanques para o cálculo, onde estão localizados os maiores valores de dissipação de energia. No modelo CFD, a estimativa é mais específica, em cada ponto do fluido. Assim, a equação 17 seria uma primeira estimativa da taxa de dissipação de energia média, com CFD seria possível uma estimativa mais real.

Para projetos de escadas de peixes, o limite máximo da taxa de dissipação de energia por unidade de volume usualmente adotado é de 150 W/m^3 para trutas e de 200 W/m^3 para salmão (Bell, 1973; Liu et al., 2006; Rodriguez et al., 2006; Larinier, 2008). Considerando esta recomendação, com base nos valores simulados, a escada está adequada para passagem dos peixes das espécies-chave desse estudo, exceto no tanque de transposição onde a taxa de dissipação possui aproximadamente o valor do limite superior. No entanto, é importante ressaltar que os limites para a taxa de dissipação de energia máxima foram determinados para escadas de peixe com características hidráulicas distintas daquelas estudadas neste estudo. Mais estudos são necessários para determinar valores de taxa de dissipação de energia para escadas de peixes com ranhuras verticais. Ressalta-se ainda que o critério seja talvez conservativo. Ainda que a taxa de dissipação de energia seja maior que os limites estabelecidos, os peixes poderiam conseguir passar através da escada usando as regiões de recirculação com baixa taxa de dissipação de energia (Liu et al., 2006).

4.3. Comentários Finais sobre o Estudo do Comportamento Hidráulico Utilizando um Modelo 3D

O escoamento em escada de peixe com ranhura vertical foi investigado através do uso de modelagem 3D. Com base nos resultados obtidos, podem ser feitos os seguintes comentários:

- Os níveis d'água e padrões de escoamento através de uma escada de peixes podem ser simulados através de ferramenta CFD, pois os níveis d'água obtidos foram bem próximos dos dados experimentais.

- O presente modelo 3D não alcançou os valores de velocidades medidos experimentalmente no modelo em escala reduzida. Os motivos prováveis são:
 - Utilização de medidor de velocidade 1D, pontual e intrusivo para as medições experimentais;
 - Efeitos de escala do modelo reduzido na turbulência;
 - Malha computacional não estava suficientemente refinada nos locais necessários;
 - Modelo de turbulência utilizado pela modelagem computacional não representou bem as flutuações de velocidade.
- Sugestões para trabalhos futuros são:
 - A utilização de outros métodos para medição da velocidade, como o Método Acústico Doppler ou o PIV (*Particle Image Velocimetry*), para a geração de dados mais passíveis de comparação com os dados simulados com CFD;
 - Mais estudos são necessários para verificar os efeitos de escala na velocidade e turbulência em escadas de peixes do tipo ranhura vertical;
 - Realizar uma análise de sensibilidade da malha e testar outros modelos de turbulência para a representação computacional.
- Ressalta-se que, como os níveis d'água simulados possuem boa concordância com os níveis experimentais, esperava-se que as velocidades também fossem semelhantes, uma vez que estas são resultantes dos desníveis entre tanques. Dessa forma, mais estudos devem ser realizados para analisar essa discrepância;
- O padrão de velocidade nos tanques é composto de duas regiões: jato e recirculação. A região de jato com alta velocidade não é impeditiva para a passagem dos peixes das espécies-chave estudadas. A região de recirculação serve para o descanso dos peixes;
- A profundidade do escoamento é adequada para as necessidades dos peixes das espécies-chave estudadas;
- A energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação de energia não devem ser impeditivas para a passagem de peixes das espécies-chave consideradas, devendo ser realizados mais estudos relativos aos limites suportados pelos peixes;
- A taxa de dissipação de energia teórica não apresentou boa concordância com os valores obtidos através de CFD, encontrando uma diferença de até 54% para o valor médio nos tanques do canal de transposição. Indica uma superestimação da taxa de dissipação de energia por meio da equação teórica, a qual poderia ser utilizada como uma primeira estimativa da energia dissipada.

5. Conclusões e Recomendações

Modelos computacionais 1D e 3D foram utilizados para simular o comportamento hidráulico de uma escada de peixe com ranhuras verticais. Os dois modelos reproduziram bem os níveis d'água experimentais, mas tiveram dificuldades em reproduzir as velocidades experimentais. Possíveis causas dessas discrepâncias foram identificadas para cada modelo.

O modelo 1D não permite a obtenção da distribuição da velocidade. Dessa forma, não é possível obter os padrões de escoamento existentes no interior dos tanques. Esses padrões são fundamentais para se entender as diferentes possibilidades que os peixes possuem no interior dos tanques, tais como o descanso nas regiões de recirculação e as regiões críticas para sua passagem, os quais foram identificados por meio do modelo 3D.

A taxa de dissipação de energia teórica obtida através do HEC-RAS para a vazão de $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ concorda com o valor teórico para a mesma vazão no CFD, igual a 215 W/m^3 . No entanto, foi observada diferença de 54% em relação ao valor médio simulado por meio do CFD (98 W/m^3), notando uma superestimação da taxa de dissipação de energia pela equação teórica. Por conseguinte, os valores teóricos do HEC-RAS podem ser utilizados como uma primeira aproximação para projetos. Vale a pena ressaltar, entretanto, que ainda existe grande incerteza com relação aos valores limites máximos suportados pelos peixes, de diferentes espécies e estágios de vida, para a taxa de dissipação de energia. Finalmente, conclui-se que ainda que não seja possível capturar os detalhes 3D com os modelos 1D, é possível utilizá-los com boa aproximação para o cálculo das diferentes características hidráulicas que influenciam a passagem dos peixes.

Com base nos resultados obtidos com as modelagens 1D e 3D, recomenda-se o procedimento a seguir para o estudo de escadas de peixes:

- 1° – Modelos 1D: Podem ser utilizados em etapas iniciais, para o estudo de viabilidade e projeto básico, uma vez que por meio de modelagens 1D é possível realizar o estudo das alternativas de projeto e utilizá-los com boa aproximação para o cálculo das diferentes características hidráulicas que influenciam a passagem dos peixes das espécies-chaves do projeto;
- 2° – Modelos 3D: Utilizados na etapa de projeto executivo, na qual um maior nível de detalhamento do projeto básico é necessário. Fornecem informações importantes para o dimensionamento final da escada de peixes;

3° – Modelo físico: O modelo físico é utilizado ainda na etapa de projeto executivo, de modo a validar os resultados obtidos anteriormente com os modelos computacionais.

Vale destacar que, de acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (Brasil, 2007), o potencial de geração de hídrica no Brasil é de cerca 126000 MW e, desse total, mais de 70% estão nas bacias do Amazonas e do Tocantins/Araguaia. Considerando a imensa diversidade ictiológica brasileira, somente na bacia amazônica e em seus rios vivem cerca de 3 mil espécies de peixes diferentes (Queiroz et al., 2013), deve ser dada uma atenção especial para a manutenção da diversidade de peixes ao modificar o ambiente aquático, com a construção de barragens, por exemplo. Medidas devem ser adotadas para que os impactos na ictiofauna da região amazônica não sejam devastadores nos próximos anos, com a possibilidade de desaparecimento de várias espécies de peixes em diversos trechos dos rios. Assim, mais estudos devem ser desenvolvidos sobre as características da ictiofauna brasileira, sobre suas capacidades biológicas, preferências e hábitos, de modo que novos projetos de STP no Brasil tenham informações concretas a respeito das necessidades biológicas das espécies de peixes que devem atender, nas quais devem se basear para a escolha do tipo de STP e para seu correto dimensionamento.

Estudos mais detalhados dos STP também devem ser realizados, uma vez que as escadas de peixes utilizadas hoje no Brasil foram projetadas, inicialmente, para espécies de peixes da América do Norte e Europa, sendo necessárias adaptações para essas estruturas se adequarem às necessidades das espécies de peixes brasileiras, que possuem características distintas das encontradas na América do Norte e Europa. Deste modo, novos tipos de escada de peixes devem ser investigados, assim como a implantação de mais um tipo de escada em cada projeto hidrelétrico, para atender as diferentes espécies de interesse. Sistemas de monitoramento dos peixes e adaptação dos projetos para diferentes vazões também devem ser avaliados.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C.; FERNANDEZ, D. R.; SUZUKI, H. I. Efficiency of fish ladders for neotropical ichthyofauna. *River Research and Applications*. 18:299–306. 2002.
- AGOSTINHO, A. A.; PELICICE, F. M.; GOMES, L. C. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. *Braz. J. Biol.*, vol.68, n.4, suppl., pp. 1119-1132. ISSN 1519-6984. 2008.
- ALDEN - Alden Research Laboratory, Inc. Feasibility Study for Willowdale Dam Fish Passage Project. Massachusetts Division of Marine Fisheries (DMF). 2006.
- ANSYS Incorporated. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, PA. 2012.
- BELL, M. C. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division. Fish Passage Development and Evaluation Program, Third edition. 1991.
- BELL, M. C. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria, U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, Ore. 1973.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030. Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007.
- CALLUAUD, D.; CORNU, V.; BOURTAL, B.; DUPUIS, L.; REFIN, C.; COURRET, D.; DAVID, L. Scale effects of turbulence in vertical slot fishways : field and laboratory measurement investigation. In: 9th International Symposium on Ecohydraulics, 17 September 2012 - 21 September 2012 (Vienne, Austria). 2012.
- CHORDA, J.; MAUBOURGUET, M. M.; ROUX, H.; LARINIER, M.; TARRADE, L.; DAVID, L. Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 48 (n° 2). pp. 141-151. ISSN 1814-2079. 2010.
- CHOW, V. T. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill. Boston. 1973.
- CLAY, C. H. Upstream Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Passage. In: Proceedings of the workshop on fish passage at hydroelectric developments: March 26-28, 1991, St. John's, Newfoundland. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* No. 1905: v + 153p. 1993.
- DANE, B.G. Culvert guidelines: recommendations for the design and installation of culverts in British Columbia to avoid conflict with anadromous fish. Fisheries & Marine Service. Technical Report No. 811. 1978.
- DIJKGRAAF, S. The functioning and significance of the lateral-line organs. *Biol. Rev.*38, 51–105. 1963.

- ENDERS, E.C.; BOISCLAIR, D.; ROY, A.G. A model of total swimming costs in turbulent flow for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 62,1079–1089. 2005.
- ENDERS, E.C.; BOISCLAIR, D.; ROY, A.G. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 60, 1149–1160. 2003.
- FEURICH, R.; BOUBÉE, J.; OLSEN, N. R. B. Improvement of fish passage in culverts using CFD. *Ecological Engineering*, Volume 47, October 2012, Pages 1-8, ISSN 0925-8574. 2012.
- GIRGIDOV, A. A. Using FLOW-3D as an Engineering Tool for Hybrid Modeling. **FLOW-3D News**: Winter 2010 - Application Note, 2010. Disponível em <http://www.flow3d.com/resources/news_10/using-flow3d-as-an-engineering-tool-for-hybrid-modeling.html>. Acesso em: 6 maio 2013.
- GODINHO, A. L.; KYNARD, B. Migratory fishes of Brazil: Life history and fish passage needs. *River Res. Applic.* 25: 702–712. doi: 10.1002/rra.1180. 2009.
- HASELBAUER, M.; MARTINEZ, C. B. Turbulent structures as success criterion for fish passages. **FLOW-3D News**: Summer 2010 - Application Note, 2010. Disponível em: <http://www.flow3d.com/resources/news_10/turbulent-structures-as-success-criterion-for-fish-passages.html>. Acesso em: 6 maio 2013.
- HUNT, J. H.; BRUNNER, G. W. Flow Transitions in Bridge Backwater Analysis. Research Document No. 42. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center. Davis, CA. 1995.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual Version 4.1, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA, 2010.
- KATOPODIS, C. Introduction to Fishway Design. Winnipeg, Freshwater Institute, 67p. 1992.
- KATOPODIS, C. Ecohydraulic approaches in aquatic ecosystems: Integration of ecological and hydraulic aspects of fish habitat connectivity and Suitability. *Ecological Engineering*, Volume 48, November 2012, Pages 1-7, ISSN 0925-8574. 2012.
- KATOPODIS, C.; WILLIAMS, J. G. The development of fish passage research in a historical context, *Ecological Engineering*, Volume 48, November 2012, Pages 8-18, ISSN 0925-8574. 2012.
- KELLER, R.J.; PETERKEN, C.J.; BERGHUIS, A.P. Design and assessment of weirs for fish passage under drowned conditions, *Ecological Engineering*, Volume 48, November 2012, Pages 61-69, ISSN 0925-8574. 2012.
- KHAN, L. A. A Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) Model Analysis of Free Surface Hydrodynamics and Fish Passage Energetics in a Vertical-Slot Fishway. **North American Journal of Fisheries Management**, 26:2, 255-267. 2006.

- KIM, S.; YU, K.; YOON, B.; LIM, Y. A numerical study on hydraulic characteristics in the ice Harbor-type fishway. *KSCE Journal of Civil Engineering*, February 2012, Volume 16, Issue 2, pp 265-272. 2012.
- LARINIER, M. Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia* 609, 97–108. 2008.
- LARINIER, M. Dams and fish migration. Contributing paper. World Commission on Dams. Environmental Issues, Dams and Fish Migration, Final Draft. Jun, 2000.
- LARINIER, M.; TRAVADE, F. Downstream migration: problems and facilities. *BFPP- Connaissance et Gestion du Patrimoine Aquatique*, 364 supplément. ISSN 1297-6318. 2002.
- LIU, M.; RAJARATNAM, N.; ZHU, D.Z. Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 132, n. 8, p. 765-777, 2006.
- LOPES, J. de M.; SILVA, F. de O. Metodologia para o planejamento, implantação, definição de objetivos e monitoramento de sistemas de transposição de peixes pela CEMIG. In: CEMIG. **Transposição de peixes**. Série Peixe Vivo. Belo Horizonte, 2012. cap. 1.
- MAGALHÃES, V. P. F.; MARTINEZ, C. B.; SANTOS, H. de A. Metodologia para determinação do efeito da intensidade de turbulência em peixes brasileiros. **PCH Notícias & SHP News**, Itajubá-MG Brasil, ano 8, v. 30, p.10-12, 2006.
- MARRINER, B. A.; BAKI, A. B. M.; ZHU, D. Z.; THIEM, J. D.; COOKE, S. J.; KATOPODIS, C. Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway, *Ecological Engineering*, Volume 63, February 2014, Pages 88-101, ISSN 0925-8574. 2014.
- MARTINS, S. L. **Sistemas para a transposição de peixes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-25072002-142649/>>. Acesso em: 20 maio 2013.
- MARTINS, S. L.; TAMADA, K. Sistemas para a Transposição de Peixes. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, BT/PHD/72. São Paulo: EPUSP. 30 p. ISSN 1413-2192. 2000.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley and Sons: New York. 1997.
- NORTHWEST HYDRAULIC CONSULTANTS. **Kokish River Hydroelectric Project - Physical Hydraulic Model Study - Final Report**. Knight Piésold Consulting (KP), Canadá, 2013.
- OLLA, B.L.; DAVIS, M.W. Effects of physical factors on the vertical distribution of larval walleye pollock *Theragra chalcogramma* under controlled laboratory conditions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 63: 105–112. 1990.

PEAKE, S.; BEAMISH, F.W.H.; MCKINLEY, R.S.; SCRUTON, D.A.; KATOPODIS, C. Relating swimming performance of lake sturgeon, *Acipenser fulvescens*, to fishway design. *Can. J Fish. Aquat. Sci.* 54, 1361–1366. 1997.

PELICICE, F. M.; AGOSTINHO, A. A. Fish-passage facilities as ecological traps in large Neotropical rivers. *Conservation Biology*. 22: 180–188, 2008.

PUERTAS, J.; PENA, L.; TEIJEIRO, T. An experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. *J. Hydraul. Eng.* 130 (1), 10–23. 2004.

PUERTAS, J.; CEA, L.; BERMÚDEZ, M.; PENA, L.; RODRÍGUEZ, Á.; RABUÑAL, J. R.; BALAIRÓN, L.; LARA, Á.; ARAMBURU, E. Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species, *Ecological Engineering*, Volume 48, November 2012, Pages 51-60, ISSN 0925-8574. 2012.

QUEIROZ, L. J. de; TORRENTE-VILARA, G.; OHARA, W. M.; PIRES, T. H. da S.; ZUANON, J.; DORIA, C. R. da C. *Peixes do Rio Madeira*. 1. ed., São Paulo: Dialetto Latin American Documentary, Obra em 3 v. 2013.

RAJARATNAM, N.; VAN DER VINNE, G.; KATOPODIS, C. Hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112 (10), 909–927. 1986.

RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C.; SOLANKI, S. New designs for vertical slot fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 19 (3), 402–414. 1992.

REN21. *Renewables Global Futures Report* (Paris: REN21). 2013.

RODRIGUEZ, T.T.; AGUDO, J.P.; MOSQUERA, L.P.; GONZALEZ, E.P. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. *Ecol. Eng.* 27(1), 37–48. 2006.

SHAW, C. T. *Using Computational Fluid Dynamics*, Prentice Hall, 1992. 315p.

SILVA, A.; KATOPODIS, C.; SANTOS, J.; FERREIRA, M.; PINHEIRO, A. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecol. Eng.* 44, 314–328. 2012.

SILVA, A. T.; SANTOS, J. M.; FERREIRA, M. T.; PINHEIRO, A. N.; KATOPODIS, C. Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway. *River Res. Applic.*, 27: 360–373. doi: 10.1002/rra.1363. 2011.

SOARES, L. M. C. **Sistemas de Transposição para Peixes: Medida mitigatória para barragens**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia do Ambiente) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto - FCUP, 2012. 64p.

TABBARA, M.; CHATILA, J.; AWWAD, R. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computer & Structures*, vol. 83, no. 27, p. 2215-2224, 2005.

TEIJEIRO, T.; PUERTAS, J.; PENA, L.; PENA, E. Evaluating vertical-slot fishway design in terms of fish swimming capacity. *Ecol. Eng.* 27, 37–48. 2006.

TONINA, D.; JORDE, K. Hydraulic modelling approaches for ecohydraulic studies: 3D, 2D, 1D and non-numeric models, In Chapter 3 of *Ecohydraulic: An Integrated Approach* edited by I. Maddock, A. Harby, P. Kemp and P. Wood, Wiley and Sons. 2013.

VANNOTE, R.L.; MINSHALL, W.G.; CUMMINS, K.W.; SEDELL, J.R.; CUSHING, C.E. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37: 130–137. 1980.

VASQUEZ, J. A. ; LIMA, G. Modelagem Numérica Bidimensional Aplicada a Hidráulica de Pontes. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. *O Desafio da Prática da Sustentabilidade na Gestão dos Recursos Hídricos: Natureza, Gente e Desenvolvimento*, 2009.

WANG, R. W.; DAVID, L.; LARINIER, M. Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. *Knowl Manag Aquat Ecosyst*, no. 396-02, doi:10.1051/kmae/2010002. 2010.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, Vol. 30: 79-82, 2005.

WU, S.; RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C. Structure of flow in vertical slot fishway. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, v. 125 (4), 351–360. 1999.