

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA A SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM UMA ESCADA PARA PEIXES COM RANHURA VERTICAL

Luísa Lüdtke Lauffer^{1}; Daniela Guzzon Sanagiotto²*

Resumo – Este trabalho apresenta resultados de um estudo que visa a calibração de um modelo numérico para a simulação de escoamentos em escadas para peixes com ranhura vertical. Para isso, foram realizadas simulações do escoamento tridimensional em uma geometria de escada para peixes com ranhura vertical e os resultados foram confrontados com dados experimentais obtidos em modelo físico. As análises são apresentadas em termos de velocidade média, pressão e parâmetro indicativo de turbulência. É feita uma comparação entre resultados simulados e medidos no jato principal e na ranhura. Os resultados mostram que o modelo numérico é capaz de representar o escoamento de forma satisfatória.

Palavras-Chave – escada para peixes, escada para peixes do tipo ranhura vertical, CFD.

CALIBRATION OF A NUMERICAL MODEL FOR FLOW SIMULATION IN A VERTICAL SLOT FISHWAY

Abstract – This study used a three-dimensional flow simulation to validate a numerical model for flow simulation in a vertical slot fishway. The results obtained through the simulation were compared with experimental data measured in a physical model. The results were showed in terms of mean velocity, pressure and turbulence kinetic energy. A comparison between simulated and measured results were made on the main jet and on the slot. The results indicate that the numerical model can represent the flow satisfactorily.

Keywords – fishway, vertical slot fishway, CFD

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS – luisalauffer@gmail.com

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS – dsanagiotto@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

A interrupção de cursos d'água para construção de barragens provoca grandes alterações no meio. Entre estes impactos está o impedimento do movimento livre de peixes. As espécies mais afetadas são as que realizam longas migrações e que precisam de diferentes habitats para completar parte de seus ciclos de vida (Agostinho *et al*, 2008). As mais conhecidas são as espécies de piracema, que realizam migrações durante o processo de reprodução. Uma das medidas para reduzir este impacto é a implementação de mecanismos de transposição de peixes, que podem ser escadas, eclusas ou elevadores.

Escadas para peixes são estruturas hidráulicas desenvolvidas para minimizar os efeitos do barramento em um curso d'água. Estas estruturas permitem o deslocamento de jusante para montante, possibilitando a migração dos peixes. Seu funcionamento consiste em dividir o desnível em tanques, permitindo aos peixes nadar ou saltar de um tanque a outro. A dissipação de energia e a redução da velocidade no decorrer do escoamento permitem a transposição dos peixes sem esforço excessivo. Os principais parâmetros de uma escada para peixes são a dimensão dos tanques e a geometria dos defletores. Estas características determinam o comportamento hidráulico do escoamento (Larinier, 2002). A eficácia de uma escada para peixes é determinada pela sua capacidade de atrair os peixes além de permitir a passagem sem grandes dificuldades. As características hidráulicas, tais como velocidade máxima e dissipação de energia devem estar de acordo com as suportadas pelos peixes (Larinier, 2002).

Sabendo da importância das variáveis hidráulicas para a eficiência das escadas para peixes e para conhecimento do escoamento, são necessários estudos que avaliem estes parâmetros. Estudos experimentais com escadas para peixes vêm sendo desenvolvidos há décadas (e.g. Rajaratnan *et al*, 1986). Nos últimos anos, estes estudos têm se intensificado (e.g. Baki *et al*, 2014). Estudos no Brasil também são importantes devido a seletividade das escadas para peixes. Devem ser conduzidos estudos tendo como referência as características dos peixes locais (e.g. Sanagitto, 2007).

Uma alternativa aos estudos conduzidos em modelo físico é a modelagem numérica, que permite de maneira mais simples e econômica, a variação de diversos fatores influentes. As simulações numéricas são possíveis graças a softwares de dinâmica de fluidos computacional (CFD). Estes softwares atuam resolvendo as equações do escoamento. Para a utilização de um método numérico, é necessário fazer a validação do método a partir de dados experimentais. Dessa forma, o modelo poderá ser utilizado para simular condições diferentes das realizadas experimentalmente.

Nesse contexto, que se encontra o desenvolvimento deste trabalho, busca-se, através de recursos de fluidodinâmica computacional, reproduzir as condições do escoamento observadas em modelo físico (resultados do modelo físico obtidos em Sanagitto, 2007). Com o modelo numérico ajustado, em estudos futuros, poderão ser avaliadas as influências no escoamento das variações da geometria (declividade, dimensões dos tanques, forma dos defletores, entre outros).

METODOLOGIA

Estrutura e geometria

A estrutura utilizada nas simulações deste trabalho consiste na escada para peixes objeto do estudo de Sanagitto (2007). Neste estudo, foi utilizada parte da escada para peixes do tipo ranhura vertical da UHE de Igarapava localizada no estado de Minas Gerais. As medições de velocidade foram realizadas em modelo na escala 1:5. A estrutura é composta de um canal contendo 9 tanques de 0,60m de largura, 0,60m de comprimento e 0,08m de largura entre os defletores (figura 1). Os

experimentos foram realizados em declividade de 6%. Os procedimentos experimentais, bem como resultados de velocidades e características turbulentas, utilizados nesse trabalho, são descritos em Sanagiotto (2007). Para o desenvolvimento deste estudo, as simulações numéricas foram realizadas em uma geometria similar a do modelo (figura 2).

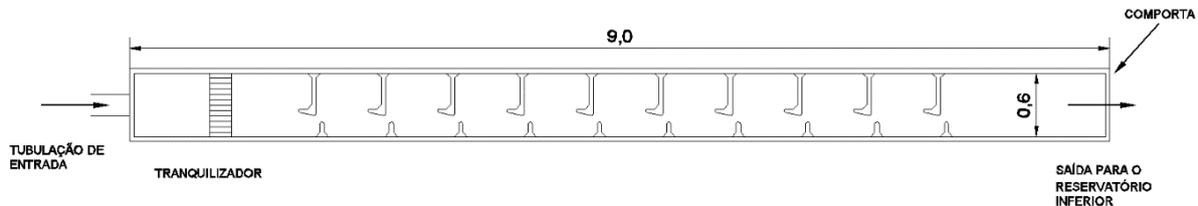


Figura 1 - Corte paralelo ao fundo da escada para peixes testada (dimensões em metros). Fonte: Sanagiotto (2007).

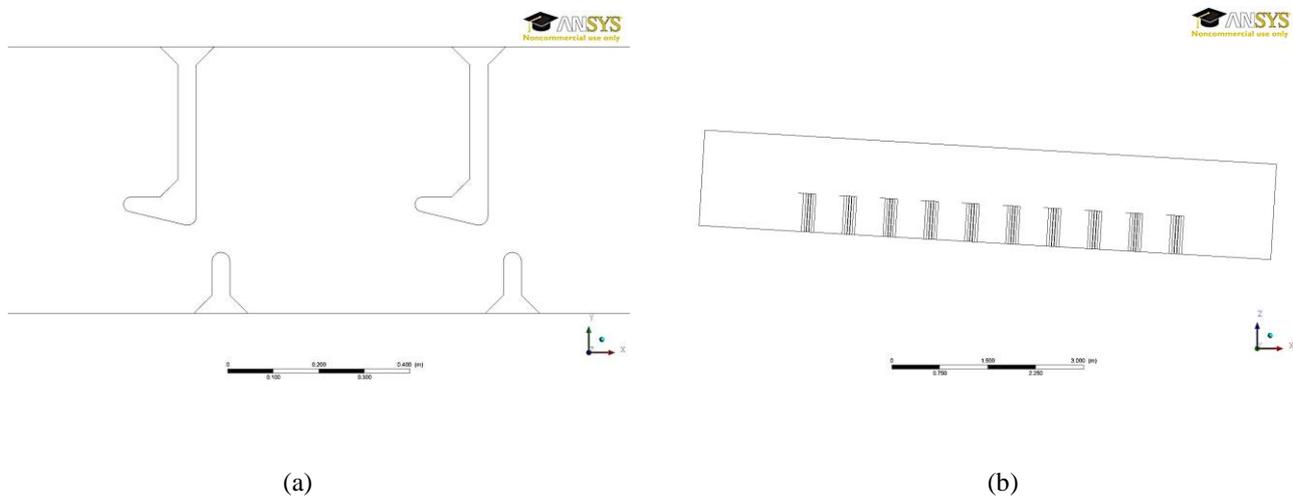


Figura 2 - Geometria utilizada nas simulações: (a) detalhe em planta e (b) em vista lateral.

Equações governantes

As simulações numéricas do escoamento foram realizadas através do software Ansys-CFX. O programa resolve as equações do escoamento através do método VOF (*volume of fluid*), que permite a simulação de escoamento com superfície livre. As equações da continuidade e momentum resolvidas pelo programa são, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica; U representa a série temporal de velocidade, que pode ser decomposta em uma parcela média e uma parcela de flutuação, que é variável no tempo t ; μ é a viscosidade dinâmica; μ_t é a viscosidade turbulenta; p' é a pressão modificada ($p' = p + 2/3 \cdot \rho \cdot k$, com k igual a energia cinética da turbulência) e S_M é o somatório das forças gravitacionais (Ansys, 2013).

No método VOF, uma fração do volume, que é a fração da célula preenchida por água, é armazenada na célula computacional. Se a célula está completamente preenchida com água, a fração do volume de água é igual à unidade e a célula é integralmente parte do corpo de água. Se o valor da fração do volume da célula for zero, esta é parte integral da atmosfera acima do corpo de água.

A geração de uma malha computacional consiste na discretização do domínio geométrico em elementos simples ou complexos. No método VOF, as equações passam a valer para cada elemento discreto, considerando o fluxo de propriedades que atravessa as superfícies/faces dos elementos. Foi gerada uma malha não estruturada, tetraédrica com aproximadamente $1,5 \times 10^6$ nós e 7×10^6 elementos. Utilizou-se uma malha adaptativa, que pode ser refinada durante a solução do problema em locais onde as variáveis possuem maior gradiente (figura 3).

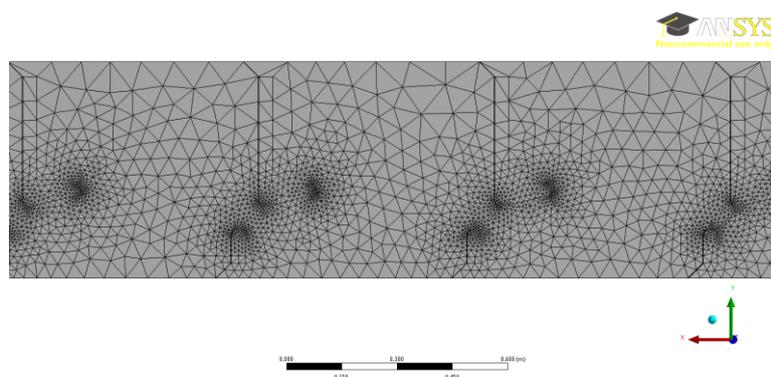


Figura 3 - Detalhe da malha na região de maior detalhamento (defletores).

O modelo de turbulência utilizado foi o $k-\epsilon$, que já foi utilizado após testes preliminares e considerando o bom desempenho relatado na bibliografia (e.g. Marriner *et al.*, 2014; Baki *et al.*, 2016).

Condições de contorno

A condição de contorno de não deslizamento foi definida nas laterais, fundo e defletores, que foram considerados lisos nas simulações. Na entrada foi informada a vazão mássica, variando entre 21,59 kg/s e 29,16 kg/s. Na saída foi considerada a pressão estática com pressão relativa determinada por expressões CEL (*CFX Expression Language*).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A identificação de um padrão de escoamento é importante para o conhecimento de regiões que influenciam o movimento dos peixes. A figura 4 representa a magnitude e distribuição dos vetores velocidade dentro do tanque. Com as simulações, é possível identificar uma região de jato principal de alta velocidade localizada entre as ranhuras consecutivas, como já relatado por outros autores e por Sanagiotto (2007). Em volta do jato principal, formam-se regiões de recirculação devido ao encontro do escoamento com a parede dos defletores. Na região principal do escoamento, a velocidade varia de 0,5 a 0,8 m/s da entrada à saída do tanque. Bombac *et al.* (2015) e Bermúdez *et al.* (2010) observaram que as máximas velocidades medidas excederam em até 50% o valor definido pela velocidade potencial, que é a velocidade máxima teórica. Bermúdez *et al.* (2010) e Bombac *et al.* (2015) explicam que essa velocidade máxima teórica desconsidera a velocidade do escoamento no tanque de montante e por isso podem ser encontrados valores superiores. Nesse estudo as máximas velocidades foram observadas no jato principal, na região entre os defletores. Os valores simulados

chegam a 0,85m/s na região da ranhura vertical. Este valor é próximo ao valor máximo esperado a partir da equação $V_{m\acute{a}x} = (2g\Delta h)^{1/2} = 0,84\text{m/s}$, onde g é a aceleração gravitacional e Δh é o desnível entre tanques consecutivos. Nas regiões de recirculação, a velocidade é bastante inferior a velocidade potencial, o que favorece a passagem dos peixes.

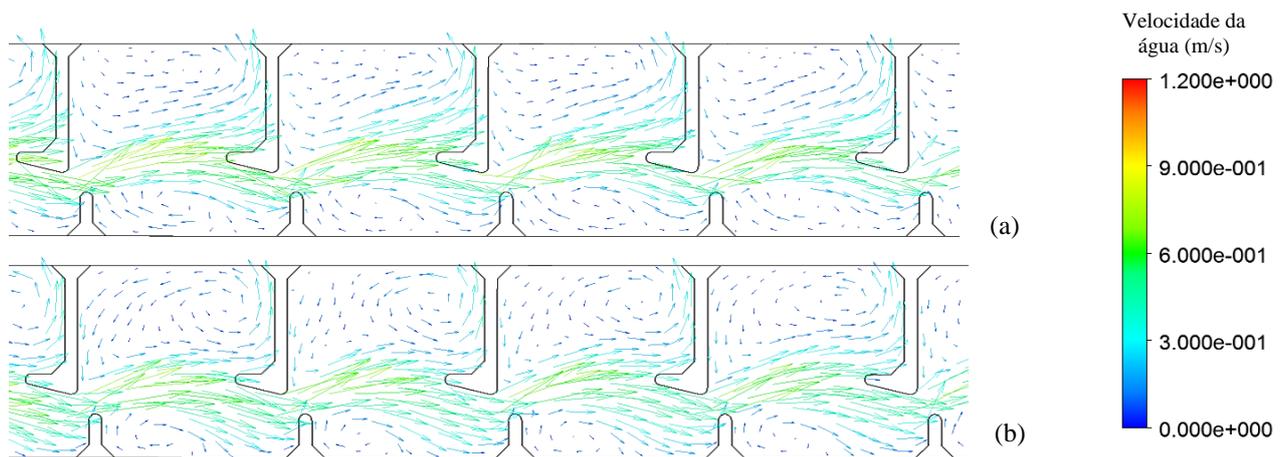


Figura 4 - Padrão de escoamento em planos localizados a (a) $0,25h_m$ e (b) $0,50h_m$, sendo h_m a profundidade média do escoamento, para a vazão mássica de $21,59\text{ kg/s}$.

Para verificar se os resultados das simulações estão representando de forma adequada o escoamento, os dados obtidos nas simulações foram confrontados com as informações obtidas experimentalmente, em modelo físico. A figura 5 compara as velocidades simuladas e medidas em um alinhamento que passa pelo jato principal. A figura 6 compara velocidades simuladas e medidas no meio da ranhura vertical, na posição entre os defletores. De forma geral, há uma boa concordância entre valores medidos e valores simulados. Ressalta-se que o local onde as velocidades simuladas e medidas diferem mais, corresponde a um ponto localizado próximo do defletor, em que há dificuldades experimentais pelo posicionamento do velocímetro.

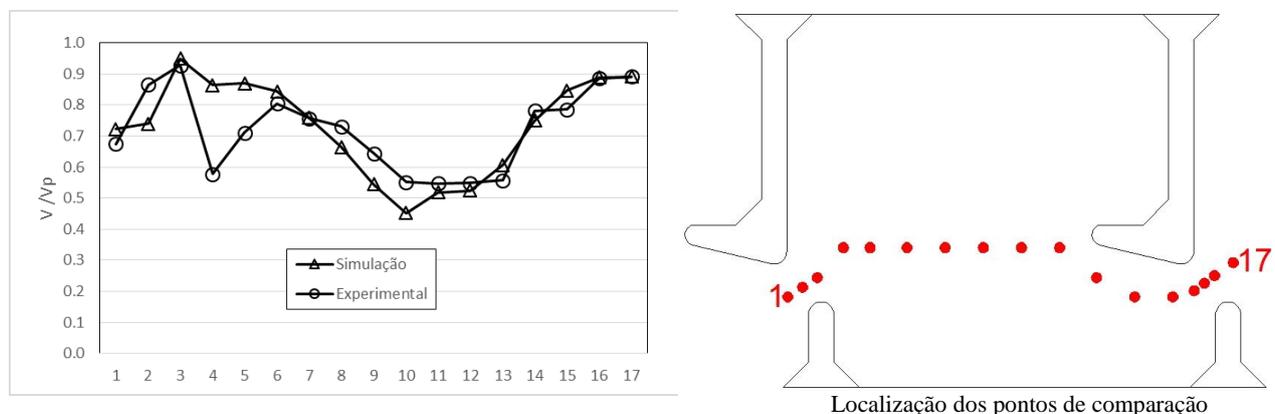


Figura 5 - Comparação de velocidades medidas e simuladas em uma linha localizada a $0,50h_m$, passando pelo jato principal, para a vazão mássica de $24,51\text{ kg/s}$ sendo h_m a profundidade média do escoamento. As velocidades estão adimensionalizadas pela velocidade potencial V_p .

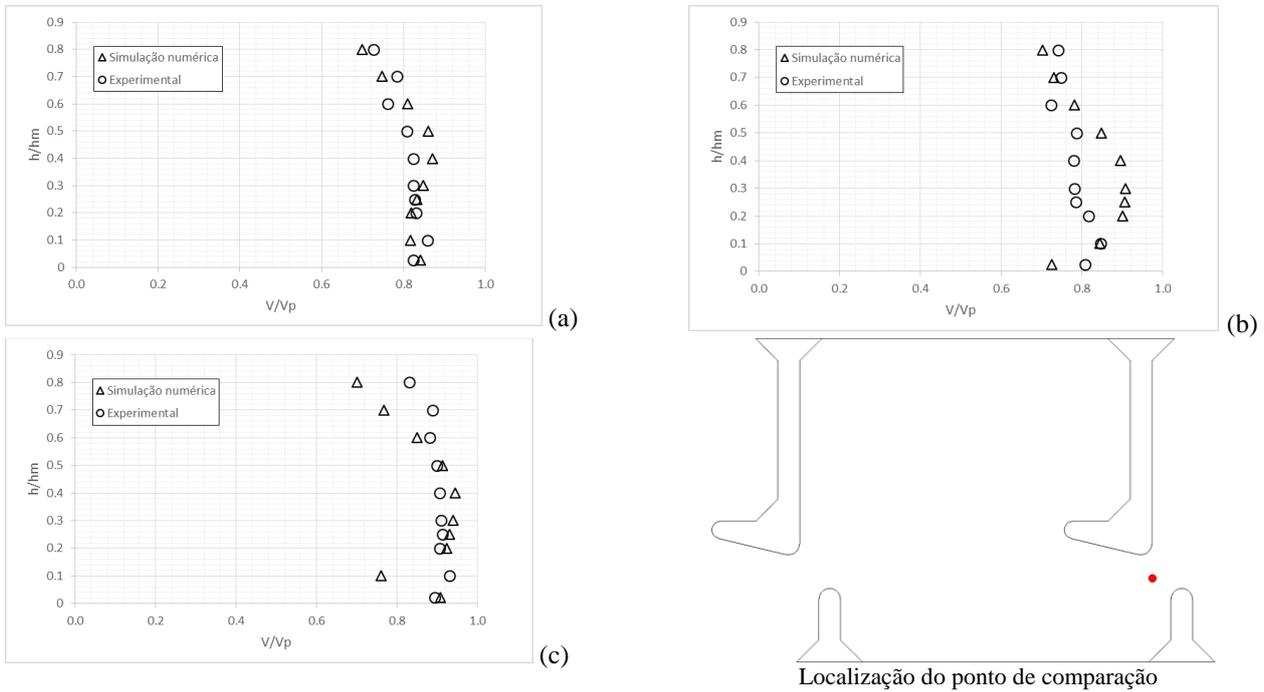


Figura 6 - Comparação de velocidades medidas e simuladas na região ranhura, passando pelo jato principal, para a vazão mássica de (a) 21,59 kg/s; (b) 24,51 kg/s e (c) 29,16 kg/s, sendo h_m a profundidade média do escoamento. As velocidades estão adimensionalizadas pela velocidade potencial V_p .

Na figura 7 é apresentado um comparativo dos valores de pressões médias medidas e simuladas.

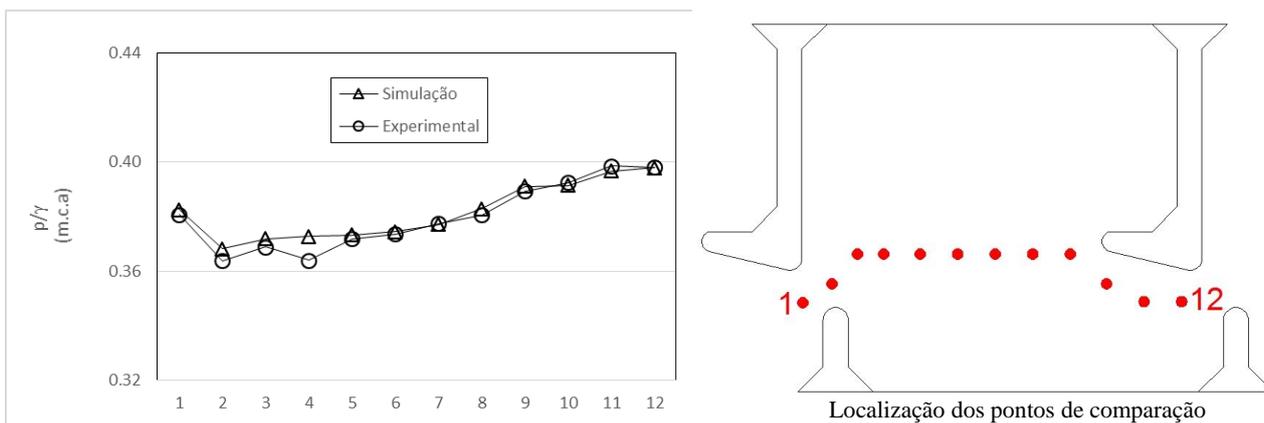


Figura 7 – Comparação das pressões médias junto ao fundo medidas e simuladas para a vazão mássica de 21,59 kg/s.

A energia cinética da turbulência está ligada às flutuações temporais dos vetores velocidade. A figura 8 representa o campo de energia cinética da turbulência no plano localizado a $0,5h_m$. Os campos de energia cinética da turbulência separam as regiões do jato principal e as regiões de recirculação. A região do jato principal apresenta valores mais elevados que as zonas de recirculação, pois os maiores valores estão relacionados com as maiores velocidades.

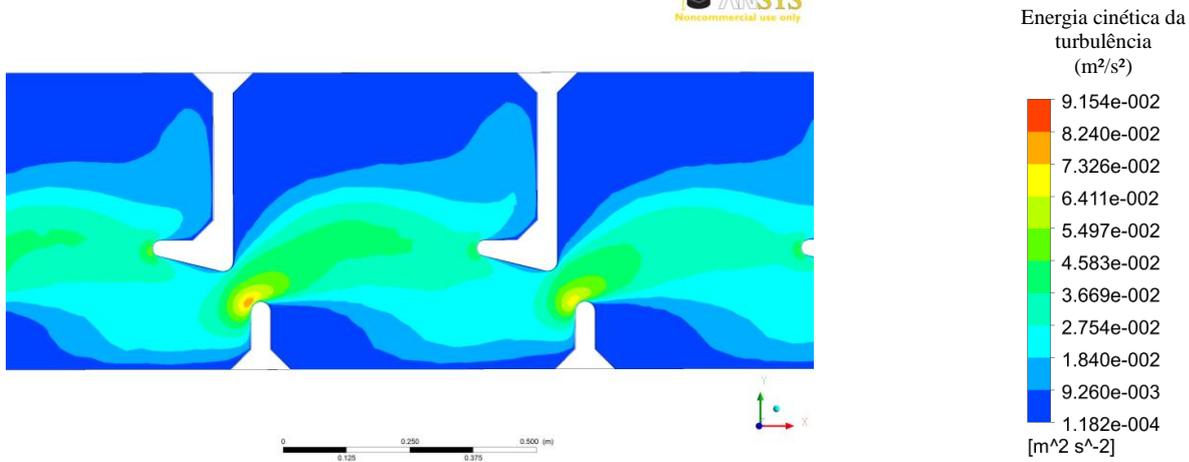


Figura 8 - Comportamento da energia cinética para um plano paralelo ao fundo distante do fundo $0,5h_m$, sendo h_m a profundidade média do tanque.

A figura 9 mostra um comparativo entre valores de energia cinética da turbulência medidos e simulados. Observa-se, de forma geral, que a simulação numérica foi capaz de representar o padrão geral do comportamento deste parâmetro indicativo da turbulência do escoamento quanto a distribuição espacial e quanto aos valores.

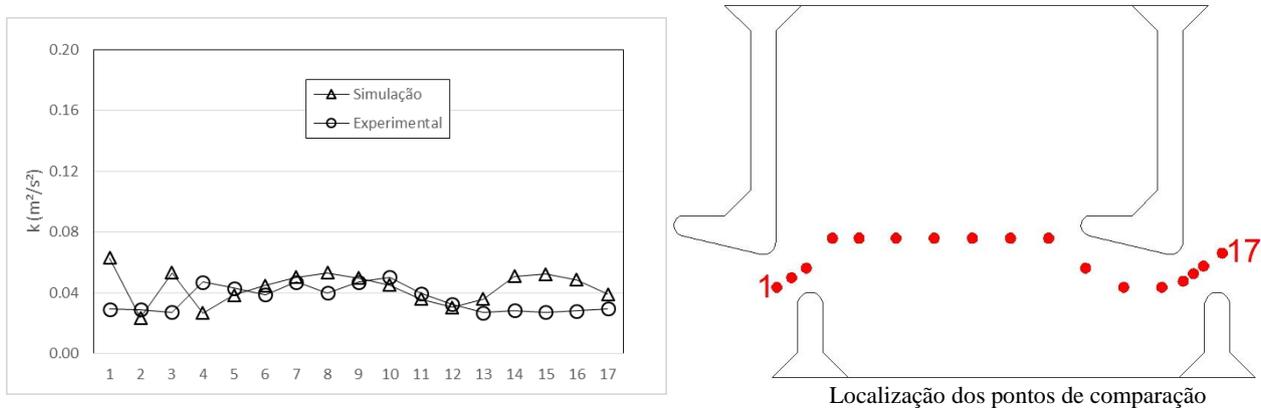


Figura 9 - Comparação da energia cinética da turbulência medida e simulada em uma linha localizada a $0,50h_m$, passando pelo jato principal, para a vazão mássica de $24,51 \text{ kg/s}$.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisados alguns parâmetros hidráulicos do escoamento em escadas para peixes utilizando a modelagem numérica. Com o objetivo de calibrar este método, foram feitas comparações entre dados simulados e dados experimentais. A avaliação do padrão de escoamento através da magnitude e orientação de vetores velocidade, juntamente com análise da turbulência, permite concluir que o método de simulação numérica adotado neste trabalho apresenta valores semelhantes aos encontrados no estudo em modelo físico. Desta forma, o modelo representa bem as condições estudadas e pode ser usado para avaliar modificações na geometria da estrutura ou no escoamento.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, A.A.; PELICICE, F.M.; GOMES, L.C. (2008). Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. *Brazilian Journal of Biology* 68(4), pp. 1119 – 1132.
- Ansys Incorporated. (2013). ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS Inc. Canonsburg, PA.
- BAKI, A.B.M.; ZHU, D.Z.; RAJARATNAM, N. (2014). Mean flow characteristics in a rockramp-type fish pass. *Journal of Hydraulic Engineering* 140 (2), pp. 156–168.
- BAKI, A.B.M.; ZHU, D.Z.; RAJARATNAM, N. (2016). Flow Simulation in a Rock-Ramp Fish Pass. *Journal of Hydraulic Engineering* 142(10), 04016031.
- BERMÚDEZ, M.; PUERTAS, J.; CEA, L.; PENA, L.; BALAIRÓN, L. (2010). Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. *Ecological Engineering* 36(2010), pp. 1355-1364.
- BOMBAC, M.; NOVAK, G.; MLACNIK, J.; CETINA, M. (2015). Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations. *Ecological Engineering* 84(2015), pp. 476-484.
- LARINIER, M. (2002). Pool fishways, pre-barrages and natural by-pass channels. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 364, pp. 54-82.
- MARRINER, B.A.; BAKI, A.B.; ZHU, D.Z.; THIEM, J.D.; COOKE, S.J.; KATOPODIS (2014). Field and numerical assessment of turning pool hydraulics in a vertical slot fishway. *Ecological Engineering* 64(2014), pp. 88-101.
- RAJARATNAM, N.; VINNE, V.D.; KATOPODIS, C. (1986). Hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering* 112(10), pp. 909-927.
- SANAGIOTTO, D.G. (2007). *Análise da macroturbulência do escoamento em escadas para peixes por bacias sucessivas*. Tese de doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 293p.