

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA EM ESCADA PARA PEIXES DO TIPO BACIAS SUCESSIVAS

Kauana Balbinot¹, João Pedro Paludo Bocchi² & Daniela Guzzon Sanagiotto³

Resumo: Neste trabalho são apresentadas características do escoamento em escada para peixes com bacias sucessivas obtidos a partir de ferramentas de fluidodinâmica computacional. A estrutura analisada é uma escada para peixes por bacias sucessivas com fluxo entre bacias por orifícios e descarregadores de superfície. Foram realizadas simulações tridimensionais bifásicas (água e ar) do escoamento em regime permanente no software Ansys CFX. Os resultados foram validados considerando dados experimentais obtidos em modelo físico.

Palavras-Chave – Escadas para peixes. Parâmetros hidráulicos.

INTRODUÇÃO

A ictiofauna, conjunto de espécies de peixes que existem em uma determinada região geográfica, desloca-se nos cursos d'água em busca de alimentos, abrigo e locais para reprodução, este último sendo o caso dos peixes migratórios na época da piracema. A construção de barramentos ao longo dos rios, utilizados para diferentes fins, tais como geração de energia e abastecimento de água, causa diversos impactos ambientais, sendo um deles o impedimento desse deslocamento da ictiofauna. Dessa forma, destacam-se os mecanismos de transposição de peixes (MTP) como uma possível solução para essa problemática, atuando como estruturas ou ações que permitem a migração dos peixes a montante e a jusante de obras que obstruem os cursos d'água.

Os MTP podem ser de diferentes modelos, tais como escadas, elevadores, eclusas, canais naturais, entre outros. As escadas para peixes consistem em canais inclinados divididos em tanques ou bacias por septos com descarregadores de superfície, orifícios ou ranhuras verticais para que os peixes possam atravessá-las (Larinier, 2000). De acordo com Martins (2000), os peixes transpõem as escadas nadando ou saltando, e os septos têm a finalidade de controlar o nível da água e de dissipar a energia do escoamento, além de proporcionar zonas de descanso para os peixes.

A construção adequada de um MTP depende das espécies de peixes que usarão os mecanismos, pois deve-se conhecer as características fisiológicas desses animais, como por exemplo, a sua capacidade natatória. Assim, deve-se estudar qual a melhor geometria e as melhores condições hidráulicas para que a transposição ocorra com o menor custo para os peixes em termos de tempo e energia (Katopodis, 1992). Algumas das características do escoamento importantes de serem avaliadas são as suas velocidades médias e a energia cinética da turbulência. De acordo com Clay (1995), a velocidade da água nas áreas de passagem entre os tanques deve ser menor que a velocidade de explosão dos peixes e a velocidade dentro dos tanques deve ser menor que a velocidade de cruzeiro.

1) Graduanda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Avenida Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomia, Porto Alegre – RS. (54) 9 9692-1144. kauanabalbinot18@gmail.com

2) Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. jp.bocchi@gmail.com

3) Professora do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Fone: (51) 3308-7930 – dsanagiotto@ufrgs.br

Quanto à turbulência, deve atentar-se a essa característica do escoamento pois ela pode causar o cansaço do peixe ou, em altos níveis, confundi-lo ao longo de seu percurso na escada (Katopodis, 2005; Mao *et al.*, 2012).

Outros fatores a serem considerados são a potência dissipada por unidade de volume e a profundidade da água. A potência dissipada é outra medida associada aos níveis de turbulência e agitação nos tanques, sendo que quanto maior a potência, maior é a dificuldade para a passagem da ictiofauna (Larinier, 2002). Sobre a profundidade da água, se ela é muito baixa, os peixes não conseguem se locomover devidamente ao longo da escada (Katopodis, 1992). Se a velocidade e a energia cinética da turbulência nas bacias são muito elevadas, ou se a profundidade da água é muito pequena, os peixes não serão capazes de nadar através da estrutura.

Em modelos físicos hidráulicos essas variáveis são calculadas através da medição de séries instantâneas de velocidades em diferentes pontos do escoamento e da aplicação de estatísticas de turbulência. Nesse contexto, as simulações computacionais também surgem como ferramentas para avaliar os parâmetros hidráulicos do escoamento, de forma que elas devem, preferencialmente, serem utilizadas juntamente a estudos experimentais para uma melhor validação de seus resultados.

As diversas possibilidades de geometrias para escadas para peixes levam à necessidade da caracterização dos seus parâmetros hidráulicos e turbulentos, a fim de selecionar a melhor estrutura para as espécies de peixes que a usarão. Esse trabalho objetiva apresentar os resultados obtidos via simulação computacional realizada no software Ansys CFX para uma escada para peixes com descarregadores de superfície e orifícios, considerando os padrões de velocidade e turbulência do escoamento nessa estrutura, bem como outros aspectos.

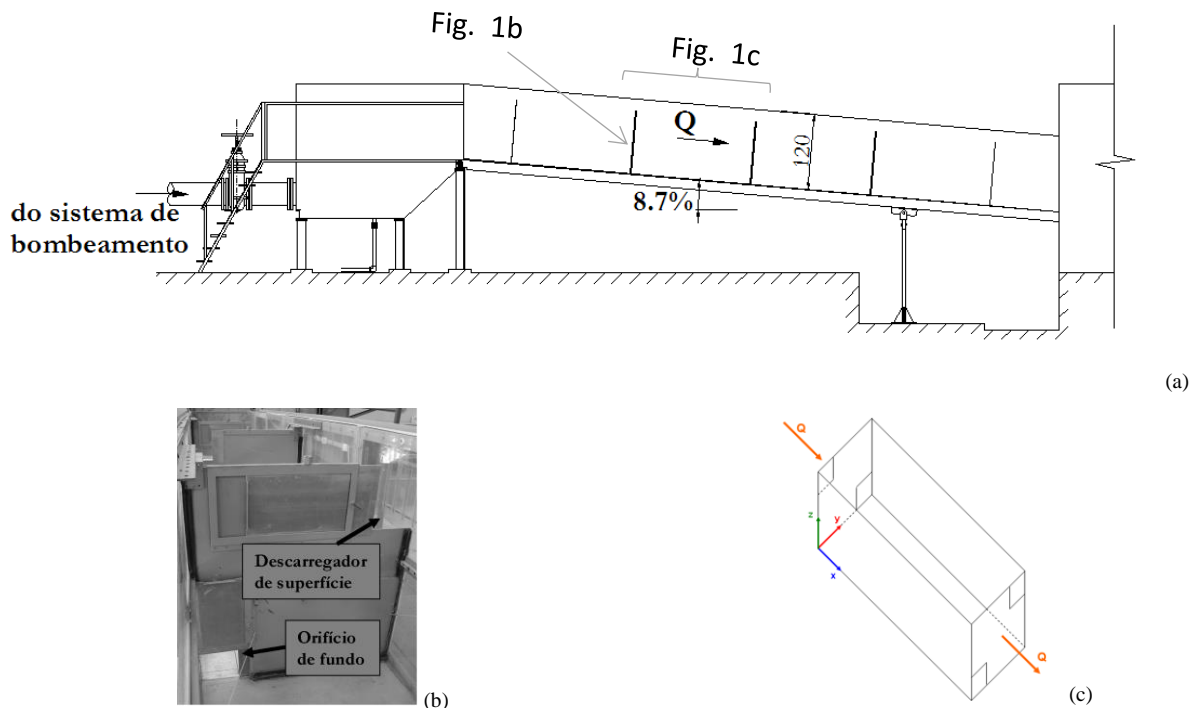
METODOLOGIA

Descrição da estrutura analisada

A escada para peixes avaliada neste trabalho representa a estrutura de uma escada para peixes por bacias sucessivas construída nas dependências do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Lisboa, Portugal (Sanagiotto, 2007). A estrutura caracteriza-se por um canal com cerca de 10 m de comprimento, 1 m de largura e declividade de fundo de 8,7 % (figura 1a). Para esse estudo foram instalados defletores espaçados de 1,9 m de comprimento, para formar os tanques ou bacias da escada para peixes. Em cada defletor foram feitas duas aberturas: um orifício de fundo, com 0,2x0,2 m² e um descarregador de superfície, com 0,2 m de largura (figura 1b). As aberturas foram instaladas em lados alternados em septos consecutivos, em uma configuração zigue-zague (figura 1c).

O sistema de bombeamento de água na estrutura ocorre em um circuito fechado. O controle das descargas de entrada no canal foi realizado através de um medidor eletromagnético de vazão com controle remoto. O ajuste da vazão de saída foi realizado através de um registro na saída da estrutura e monitoramento dos níveis de água ao longo do canal para garantir a realização de ensaios em regime permanente. Os resultados das medições realizadas nesta estrutura estão apresentados em Bocchi *et al.* (2016).

Figura 1 – Estrutura experimental objeto deste estudo: (a) esquema do canal; (b) vista do defletor entre tanques; (c) esquema para o tanque de controle da configuração zigue-zague dos defletores ao longo do canal. Fonte: Bocchi *et al.* (2016).



Simulação computacional do escoamento

Foram realizadas simulações tridimensionais bifásicas (água e ar) do escoamento em regime permanente utilizando o software Ansys CFX, que utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações da continuidade e momentum (ANSYS, 2013). A turbulência foi modelada a partir das equações da média de Reynolds para Navier-Stokes (RANS) em três dimensões, com o modelo de turbulência k- ϵ , apresentado em Launder e Spalding (1974) e com histórico de aplicações em simulação numérica de escoamentos sobre vertedouros. As equações da continuidade e de 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).

O modelo multifásico adotado foi o homogêneo, com modelo de superfície livre na interface. O modelo homogêneo corresponde ao método VOF (Volume of Fluid), proposto por Hirt e Nichols (1981). Neste método, as equações do escoamento são resolvidas, armazenando o volume das duas fases fluidas em cada célula computacional. Nas células, a soma das frações de volume de ar e água é igual a unidade.

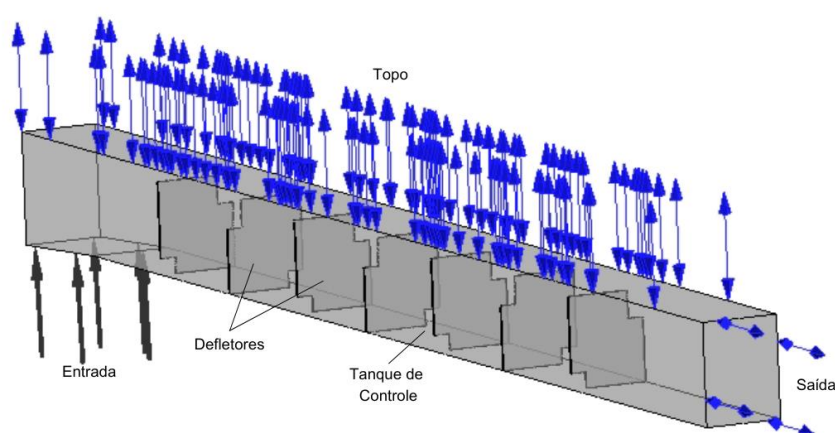
Para a discretização do domínio geométrico foram definidas malhas não estruturadas, tetraédricas. Foi utilizada uma adaptação de malha na interface ar-água para melhorar a definição da

superfície livre e adotado um maior detalhamento na região dos defletores. Foram realizadas simulações prévias para avaliar a adequação da malha utilizada.

A geometria do domínio simulado foi desenvolvida em um software de CAD (Computer Aided Design), com as dimensões representadas em escala. O domínio da simulação incluiu 6 tanques de uma escada para peixes mais uma região de aproximação a montante e uma região de saída a jusante. Como condições de contorno, foi utilizada uma condição de entrada de vazão mássica; uma condição de saída de pressão hidrostática; condições de parede (*no-slip*); e condições de abertura na parte superior.

A figura 2 mostra o domínio utilizado na simulação. Os resultados dos campos de escoamento apresentados neste artigo são os resultados obtidos no tanque de controle, correspondente ao quarto tanque (analisando de montante para jusante).

Figura 2 – Domínio utilizado na simulação.



Condições simuladas e grandezas avaliadas

Foram realizadas simulações do escoamento para a vazão 69,79 kg/s, que corresponde a vazão de ensaio realizada em laboratório. Avaliou-se campos de velocidade média, de energia cinética da turbulência e de potência dissipada do escoamento, bem como a profundidade da água.

RESULTADOS

Profundidade da Água

A avaliação da profundidade da linha d'água foi realizada através da definição de uma isosuperfície referente à variável fração água/ar, atribuindo um valor de 0,5.. O resultado obtido pode ser verificado na figura 3.

Embora na região de saída o resultado da simulação não represente as condições observadas em laboratório, ao longo do canal o escoamento pode ser considerado uniforme, visto que as profundidades observadas nos vários tanques em pontos correspondentes apresentam diferenças insignificantes (figura 4). O escoamento ocorre em condições permanentes pois o valor observado de vazão saindo do domínio está muito próximo do valor da vazão de entrada, com um erro de 1,66%.

Figura 3 – Isosuperfície da fração água/ar = 0,5 representando a linha da água.

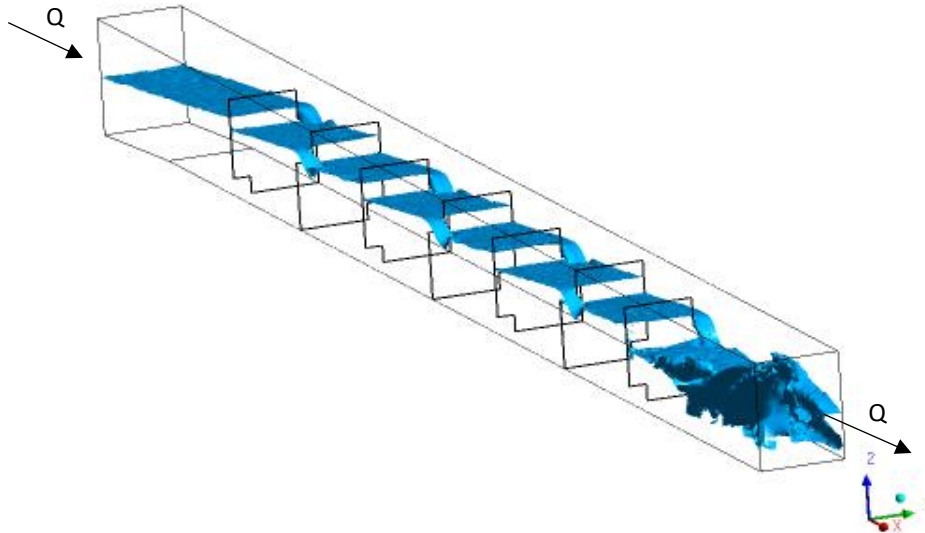
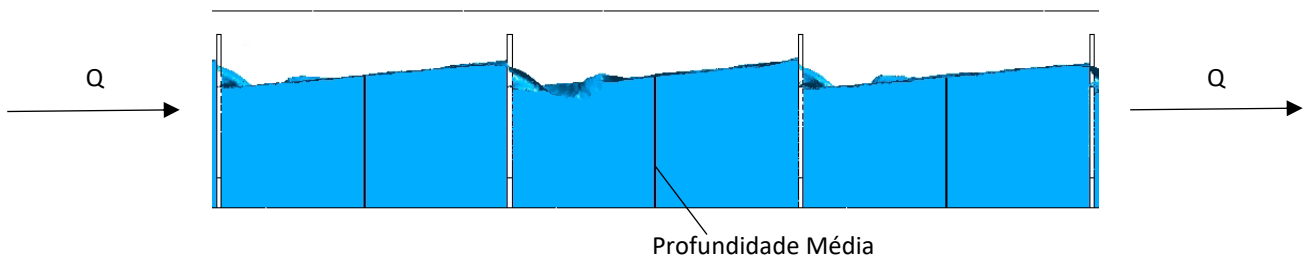


Figura 4 – Medição da profundidade da água no tanque de controle e nos tanques adjacentes.



Assim, verificou-se que o nível médio da água para a vazão de 69,79kg/s é 0,87 metros (m), obtendo esse mesmo valor para os tanques a montante e a jusante do tanque de controle, garantindo também a uniformidade do escoamento.

Campos de velocidades médias

Os campos de velocidades médias foram traçados para diferentes planos paralelos ao fundo, apresentados na figura 5, e para dois planos longitudinais verticais, apresentados na figura 6. A partir da avaliação deste resultado, pode-se melhor compreender a dinâmica do escoamento.

Verifica-se que o escoamento é tridimensional e que as velocidades máximas ocorrem próximo aos descarregadores de superfície e aos orifícios de fundo, indo de acordo com os resultados visualizados por Bocchi *et al* (2016). Nos planos paralelos ao fundo, observaram-se maiores velocidades na altura de 0,10 m e 0,80 m, que correspondem a alturas que abrangem a região do orifício e do descarregador, respectivamente. Nos planos longitudinais, que estão localizados em larguras que compreendem os orifícios e os descarregadores, percebe-se que o fluxo escoava alternando a passagem entre descarregador e orifício. Regiões possíveis para o descanso dos peixes seriam as de menor velocidades, onde há regiões de recirculação de água, portanto, na região central do tanque, tanto em termos longitudinais quanto verticais (Bocchi *et al.*, 2016).

Figura 5 – Campos de velocidades médias em planos paralelos ao fundo (planos xy) para diferentes distâncias do fundo.

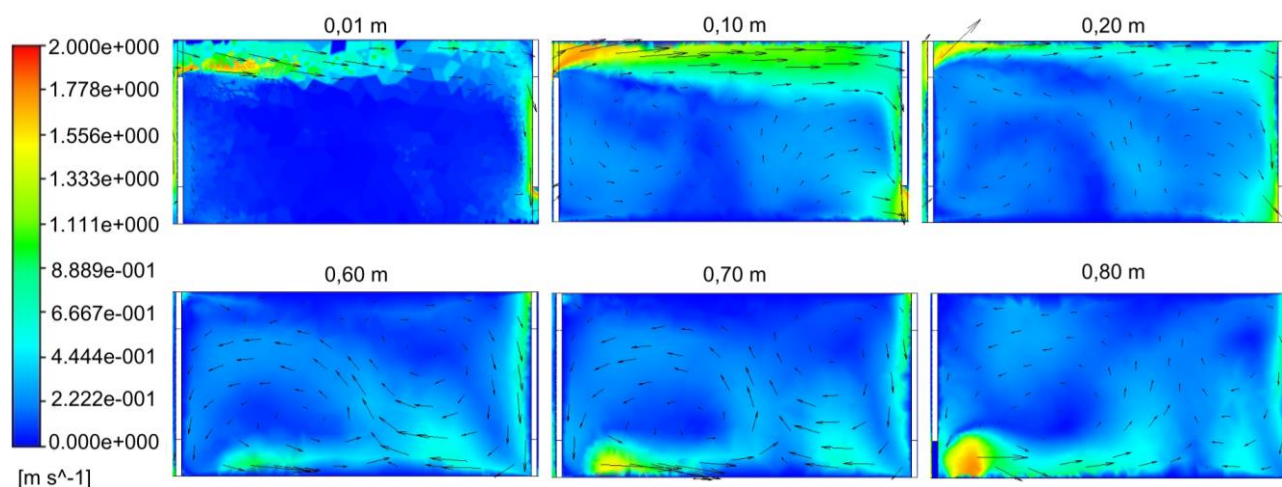
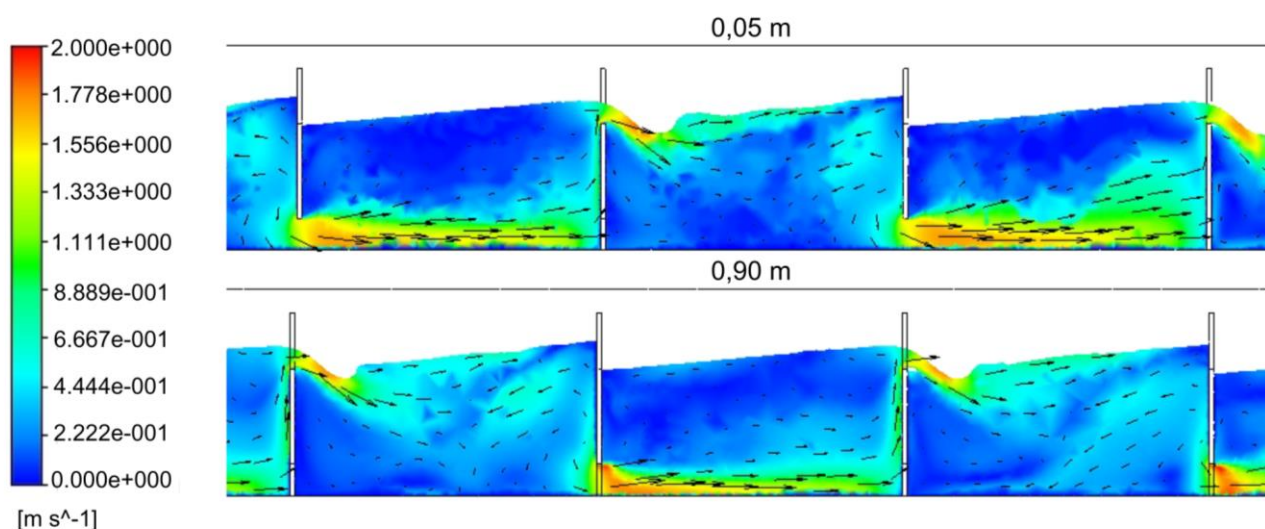


Figura 6 – Campos de velocidades médias em planos verticais longitudinais (planos xz) para diferentes posições Y.



As velocidades máximas observadas foram 2,00 m/s e 2,10 m/s para a região do orifício e do descarregador, respectivamente. Esses valores são superiores a velocidade máxima de 1,80 m/s, estimada a partir da equação da velocidade potencial:

$$V = \sqrt{(2 \times g \times \Delta h)} \quad (2)$$

em que g é a aceleração da gravidade e Δh é o desnível entre tanques consecutivos, sendo nesse caso aproximadamente 0,165 m.

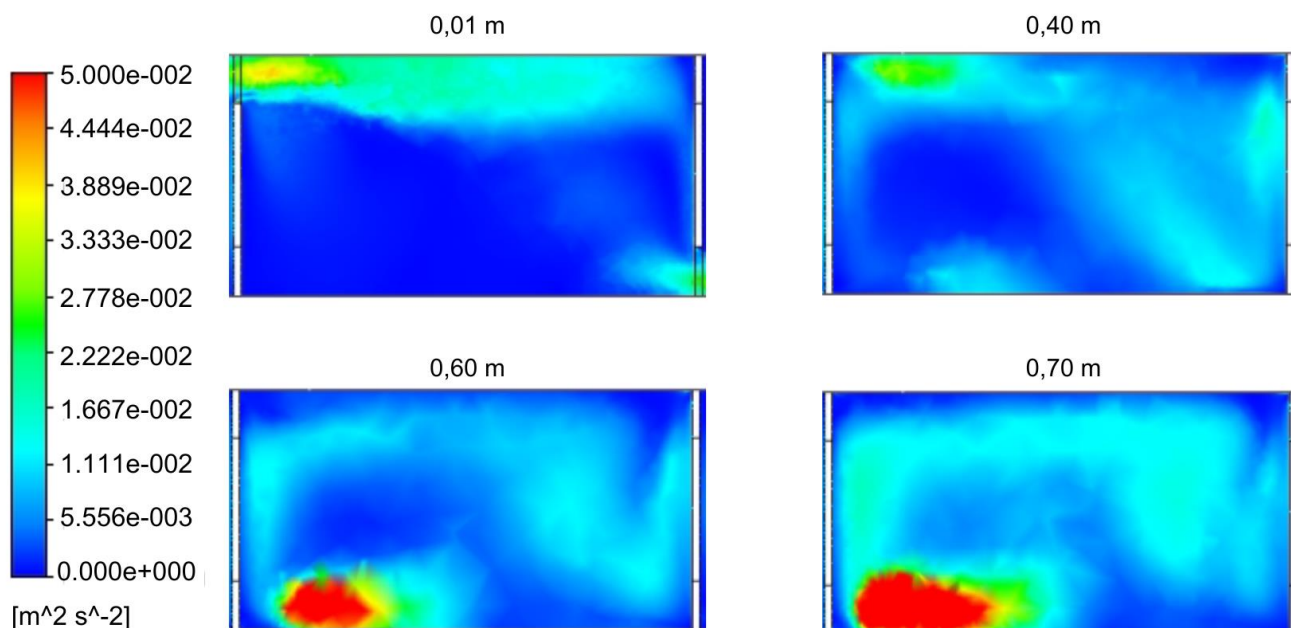
Quanto aos máximos valores experimentais, eles são bastante inferiores aos valores obtidos nas simulações. Não se pode comparar diretamente os dados de valores de velocidade computacionais e experimentais pois, pela simulação numérica, mediu-se os valores máximos da velocidade exatamente nos pontos em que se encontram os orifícios e os descarregadores; já, experimentalmente, isso não foi possível por limitações associadas ao equipamento utilizado.

Energia cinética da turbulência - k

Nas figuras 7 e 8 são apresentados campos de energia cinética da turbulência em planos paralelos ao fundo e em planos verticais longitudinais, respectivamente. A maior parte do escoamento

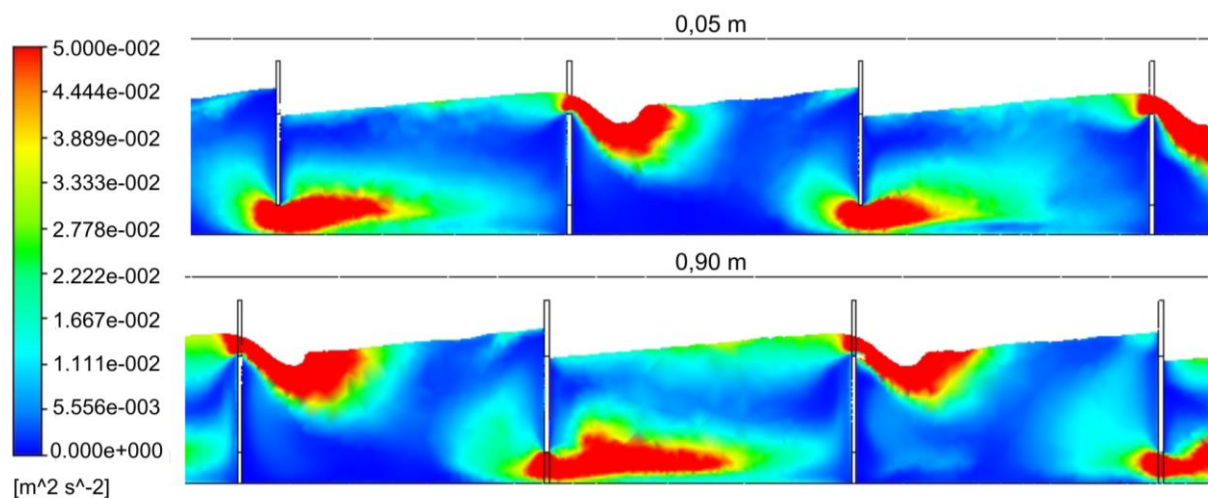
apresenta valores de energia cinética da turbulência inferiores a $0,05 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Nas regiões de passagem de água entre tanques (orifícios e descarregadores) são encontrados os valores máximos, como fica evidente nas figuras 7 e 8. Embora a escala selecionada para representar os campos se limite ao valor de $0,05 \text{ m}^2/\text{s}^2$, uma análise pontual indica que ocorrem valores máximos de $0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ em pontos localizados na região dos orifícios e descarregadores, que caracterizam os corredores de passagens.

Figura 7 – Campos de energia cinética da turbulência em planos paralelos ao fundo (planos xy) para diferentes distâncias do fundo.



As áreas propícias para o descanso dos peixes são as com menores valores de energia cinética da turbulência Silva *et al.* (2011) verificaram que para a espécie barbo ibérico (*Luciobarbus bocagei*), em uma escada com bacias sucessivas, peixes adultos pequenos e grandes utilizaram principalmente áreas com $k < 0,05 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Figura 8 – Campos de energia cinética da turbulência em planos verticais longitudinais (planos xz) para diferentes posições Y.



Potência dissipada por unidade de volume - P_v

A potência dissipada é outra medida relacionada a turbulência do escoamento. Os campos de potência dissipada em planos paralelos ao fundo e em planos longitudinais verticais podem ser visualizados na figura 9 e na figura 10, respectivamente:

Figura 9 – Campos de potência dissipada por unidade de volume em planos paralelos ao fundo (planos xy) para diferentes distâncias do fundo.

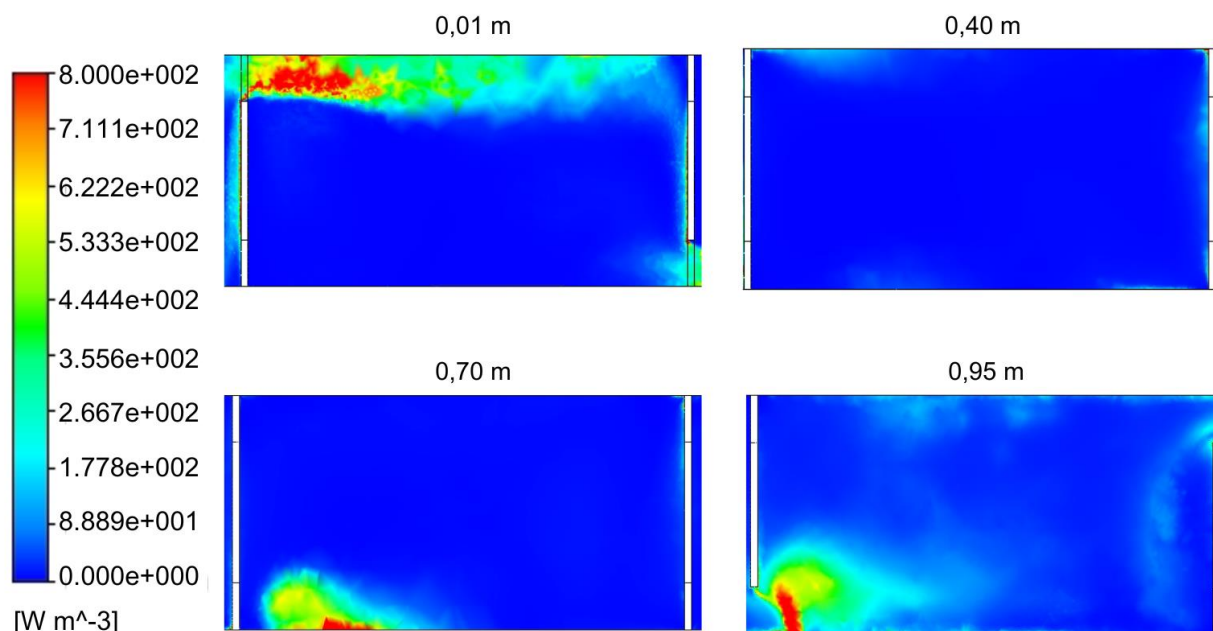
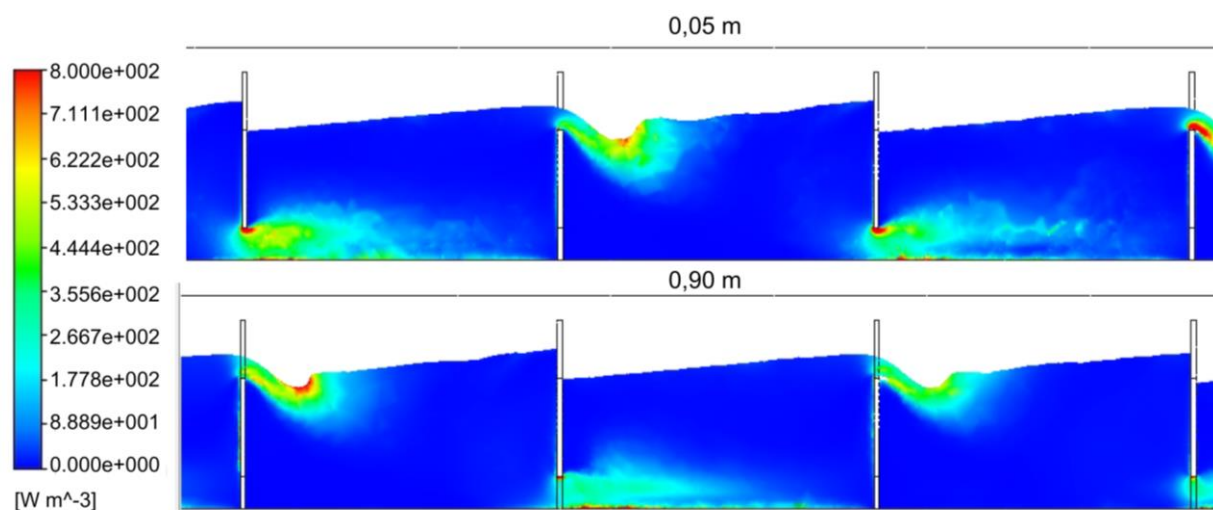


Figura 10 – Campos de potência dissipada por unidade de volume em planos verticais longitudinais (planos xz) para diferentes posições Y.



Os maiores valores de potência dissipada encontram-se próximos às regiões que sofrem influência dos jatos provenientes dos descarregadores e dos orifícios, tal como observado para a energia cinética da turbulência. Em algumas áreas localizadas do descarregador e do orifício observaram-se valores de potência dissipada em torno de 800 W/m^3 , mas essas áreas são muito pequenas, não interferindo de forma significativa no escoamento, onde, em geral, foram observados valores menores que 800 W/m^3 .

Segundo Towler *et al.* (2015), para escadas para peixes por bacias sucessivas, os valores de potência dissipada por unidade de volume deveriam variar entre 92 W/m^3 e $239,40 \text{ W/m}^3$. Esses valores se referem a uma avaliação simplificada da potência dissipada, dada pela expressão:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot \Delta h / \text{Volume do tanque} \quad (3)$$

A avaliação simplificada da potência dissipada por unidade de volume para as condições avaliadas por Bocchi *et al.* (2016) resulta no valor $68,3 \text{ W/m}^3$. Essa diferença entre os valores médios e a ampla faixa de valores distribuídos espacialmente no escoamento indica que ainda que a potência dissipada por unidade de volume se encontre na faixa considerada adequada para a passagem dos peixes, há regiões ao longo do escoamento em que os valores podem ser bastante superiores aos valores médios e podem representar potenciais barreiras ao deslocamento dos peixes.

CONCLUSÕES

O escoamento em uma escada para peixes por bacias sucessivas com descarregadores de superfície e orifícios de fundo apresentou um comportamento tridimensional, com fluxo de água alternado entre descarregadores e orifícios. Os maiores valores de velocidade média, energia cinética da turbulência e potência dissipada ocorrem nas áreas próximas dos descarregadores de superfícies e dos orifícios de fundo. Levando em conta que as variáveis de energia cinética da turbulência e potência dissipada são funções das flutuações de velocidade, pode-se afirmar que essas regiões são as que apresentam uma maior turbulência do escoamento. A região central do tanque é própria para o descanso dos peixes, devido aos menores valores desses parâmetros. Ainda, os padrões de escoamento verificados computacionalmente são semelhantes aos obtidos por medição em modelo físico hidráulico, apresentados por Bocchi *et al.* (2016).

O tipo de estrutura analisada permite que diversas espécies de peixes, com características natatórias diferentes, a utilizem, já que possui dois tipos de abertura. Os resultados encontrados possibilitam comparar as características hidráulicas do escoamento com os valores suportados pelas espécies de peixes que utilizam escadas com descarregadores de superfície e orifícios de fundo.

A análise utilizando ferramentas de fluidodinâmica computacional se mostrou adequada para representar o escoamento nesse tipo de estrutura.

AGRADECIMENTOS - As autoras agradecem à UFRGS pela concessão da bolsa de iniciação científica da primeira autora e ao Laboratório de Obras Hidráulicas pelo auxílio a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, C. F. X. (2013). “C.F.X. Ansys, Solver theory guide”. Release 15 (november), 209.
- BOCCHI, J.P.P.; CARISSIMI, E.; TEIXEIRA, E.D.; ENDRES, L.A.M.; MARQUES, M.G.; SANAGIOTTO, D.G. (2016). “Turbulência do escoamento em escadas para peixes com descarregador de superfície e orifício de fundo” in Anais do XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Set, 2016.
- CLAY, C.H. (1998). *Design of fishways and other fish facilities*. Lewis Publishers, Boca Raton-Flórida, 248 p.
- HIRT, C.W; NICHOLS, B.D (1981). “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”. *Journal Of Computational Physics*, [S.L.], v. 39, n. 1, pp. 201 – 225.

- KATOPODIS, C. (2005). *“Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works”*. Journal of Hydraulic Research, 43(5), pp. 451 – 467.
- KATOPODIS, C. (1992). *“Introduction to fishway design”*. Freshwater Institute, Department of Fisheries and Oceans, Winnipeg, Canada. 68 p.
- LARINIER, Michel. (2000). *“Dams and Fish Migration”*. World Commission on Dams, FAO Fisheries Technical Paper, 26 p.
- LARINIER, M. (2002). *“Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels”*. Bulletin Français de La Pêche Et de La Pisciculture, [S.L.], n. 364, pp. 54 – 82.
- LAUNDER, B.E; SPALDING, D.B (1974). *“The numerical computation of turbulent flows”*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Elsevier, Vol. 3, pp. 269 – 289.
- MAO, X; FU, J; TUO, Y; AN, R; LI, J. (2012). *“Influence of structure on hydraulic characteristics of T shape fishway”*. Journal of Hydrodynamics, 24(5), pp.684 – 691.
- MARTINS, S.L. (2000). *“Sistemas para a Transposição de Peixes”*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP. 184 p.
- 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.
- SILVA, A.; SANTOS, J.; FERREIRA, M.T.; PINHEIRO, A.; KATOPODIS, C. (2011). *“Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian Barbel (Luciobargus bocagel, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway”*. River Res. Appl. 27, pp. 360 – 373.
- TOWLER, B.; MULLIGAN, K.; Haro, A. (2015). *“Derivation and application of the energy dissipation factor in the design of fishways”*. Ecological Engineering, Elsevier, Vol. 83, pp. 208 – 217.