

OTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA DE ESCADAS PARA PEIXES DE RANHURA VERTICAL

Júlia Brusso Rossi¹, Daniela Guzzon Sanagiotto²

^{1,2} Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH/UFRGS, Brasil

julia.rossi@ufrgs.br, dsanagiotto@ufrgs.br

RESUMO:

O escoamento nas escadas para peixes deve possuir características que permitam que o peixe realize uma passagem segura pela estrutura. Este trabalho utiliza dinâmica de fluidos computacional (CFD) para investigar os padrões médios e turbulentos do escoamento em diferentes geometrias de escadas para peixes de ranhura vertical. O estudo avalia a influência da declividade longitudinal do canal e da presença ou não de um elemento cilíndrico nos tanques da escada. Da análise comparativa entre as geometrias se verificou que as maiores velocidades ocorreram nas estruturas de maiores declividades, principalmente na região de entrada do escoamento no tanque. A adição do cilindro reduziu as velocidades médias encontradas e a energia cinética da turbulência na região de influência do cilindro, indicando condições mais favoráveis para a passagem dos peixes. Ainda, se verificou que as máximas velocidades médias encontradas neste estudo foram entre 26% e 66% superiores às esperadas pela equação teórica.

ABSTRACT:

The flow in a fishway must have characteristics that allow the fish to make a safe passage through the structure. This work uses computational fluid dynamics (CFD) to investigate the mean and turbulent flow patterns in different geometries of vertical slot fishways. The study evaluates the influence of the canal longitudinal slope and the presence or not of a cylindrical element in the pools. From the comparative analysis between the geometries it was verified that the higher velocities occurred in the structures of larger slopes, mainly in the region of entrance of the flow in the pool. The addition of a cylinder reduced the average velocities found and the turbulence kinetic energy in the region of influence of the cylinder, indicating more favorable conditions for the fish passage. Moreover, it was found that the maximum average velocities found in this study were between 26% and 66% higher than expected by the theoretical equation.

PALAVRAS CHAVE: escada para peixes; simulação numérica; otimização de defletores; velocidade do escoamento; ranhura vertical.

INTRODUÇÃO

Os mecanismos de transposição de peixes (MTP) são estruturas que permitem o trânsito de organismos aquáticos entre jusante e montante de barramentos em rios, permitindo, por exemplo, que as espécies que migram no processo reprodutivo alcancem seus locais de desova. A passagem a ser construída deve atrair os peixes e proporcionar um percurso seguro com mínimo gasto em tempo e energia. A velocidade do escoamento é um fator limitador a passagem dos peixes, sendo determinante para a eficiência da passagem de certas espécies. O parâmetro mais importante que determina a vazão e a velocidade máxima do escoamento é a diferença de nível de água entre dois tanques adjacentes (juntamente com a dimensão da ranhura) (Bombač *et al.*, 2017). Portanto, a eficiência biológica de um projeto de passagem para peixes é determinada por variáveis hidrodinâmicas tais como a velocidade, a profundidade de água e os campos de turbulência nas bacias (Bermúdez *et al.*, 2010).

Os mecanismos tipo ranhuras verticais utilizam configurações de arranjos de defletores formando uma abertura vertical entre eles, por onde ocorre o fluxo através dos tanques. Normalmente o escoamento nestas estruturas se caracteriza por apresentar duas regiões bem definidas, de maiores e menores velocidades, que são a região do jato principal e as áreas de recirculação adjacentes a ele, respectivamente. Os defletores verticais propiciam a passagem para peixes com diferentes características, visto que podem escolher a profundidade que desejam fazer a passagem, devido a abertura da ranhura sem obstrução ao longo de toda a profundidade do tanque.

Alguns estudos têm incluído elementos no interior das passagens para peixes para melhorar as condições de dissipação de energia e das distribuições de velocidades. Baki *et al.* (2016) apresentaram uma estrutura com a presença de elementos arredondados distribuídos no fundo de um canal de transposição. Nessa configuração a inserção dos volumes arredondados busca representar condições próximas às encontradas em cursos d'água naturais. Calluud *et al.* (2014) incluíram elementos dentro dos tanques de passagens para peixes com tanques consecutivos. Esses autores trouxeram uma configuração com um único cilindro por tanque após a abertura entre defletores de uma escada com ranhura vertical. Os autores observaram que um cilindro produz reduções significativas nas amplitudes locais da velocidade do fluxo, da vorticidade e da energia cinética turbulenta, sem modificação da velocidade média na ranhura ou no padrão geral de fluxo. (Calluud *et al.*, 2014).

A dinâmica de fluidos computacional (CFD) permite contribuir para a análise de condições do escoamento para diferentes geometrias de escadas para peixes. Se o modelo numérico é validado a partir de dados de estudos experimentais, este traz a possibilidade de testar novas estruturas derivadas da experimental, com resultados do escoamento obtidos com a variação das principais variáveis de interesse. Exemplos de estudos com simulação tridimensional no ANSYS-CFX são apresentados em Baki *et al.* (2016), Marriner *et al.* (2016), Sanagiotto *et al.* (2016), entre outros. Ressalta-se, que há uma maior quantidade de estudos realizados com simulação numérica 2D, como os trabalhos de Alvarez-Vázquez, (2008); Bermudez *et al.*, (2010); Cea *et al.*, (2007) e Bombač *et al.* (2017), entre outros. No entanto, os estudos tridimensionais são necessários principalmente para as geometrias mais complexas e/ou com maiores declividades, onde surgem componentes verticais significativas.

Neste contexto, este estudo busca analisar o escoamento em uma escada para peixes com ranhura vertical utilizando um software de simulação numérica tridimensional, validar o seu uso, a partir da comparação dos resultados com informações experimentais e, buscar alterar sua geometria, para tornar o escoamento menos seletivo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O escoamento foi modelado em uma escada para peixes com ranhuras verticais, escolhida a partir dos trabalhos de Bombač *et al.* (2015) e Bombač *et al.* (2017), onde são apresentados dados experimentais e de simulação numérica. A estrutura caracteriza-se por 9 tanques consecutivos de 3

m de comprimento, com trechos de entrada e saída de 9.5 m cada, totalizando uma geometria de 46 m de comprimento e 2.2 m de largura (Figura 1). Detalhes dos defletores da geometria de referência e suas dimensões podem ser vistos na Figura 2a.

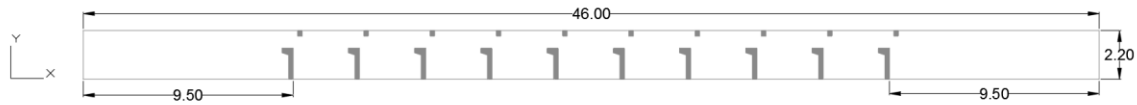


Figura 1.- Esquema geral da estrutura testada neste trabalho (dimensões em metros).

As configurações de defletores estudados neste trabalho estão apresentadas na Figura 2. Após a validação do modelo para a geometria de referência, a partir do confronto com os dados de Bombač *et al.* (2015), foi proposta uma modificação da geometria (Figura 2a para a 2b), onde um elemento cilíndrico, com 0.4 m de altura e 0.4 m de diâmetro, foi incluído após a abertura entre os defletores, como visto em propostas em estudos anteriores (e.g. Callaud *et al.*, 2014).

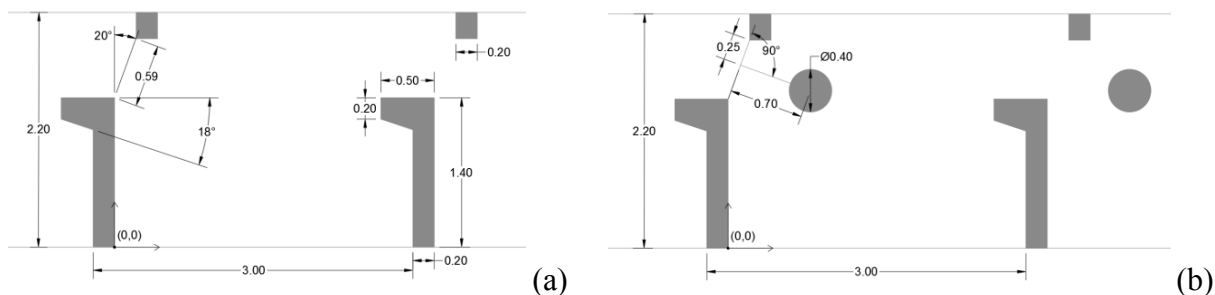


Figura 2.- Geometria dos tanques das escadas para peixes utilizadas neste estudo: (a) geometria 1 – referência; (b) geometria 2 – com inserção do cilindro (dimensões em metros).

Foram realizadas simulações testando diferentes malhas com o objetivo de verificar se a malha testada era adequada e garantir a independência da malha nos resultados. As características das malhas analisadas são mostradas na Tabela 1. Foi escolhida a Malha 2, uma malha tetraédrica com refinamento junto aos defletores, que apresentou bons resultados nas simulações, e na comparação com os resultados de Bombač *et al.* (2015), como será visto adiante (Figura 4). No entanto, ressalta-se que as três malhas testadas foram capazes de representar de forma adequada o escoamento na estrutura.

Tabela 1.- Tamanho das malhas testadas

Malhas	Nós	Elementos	Taxa de crescimento	Tamanho (m)
Malha 1	4.05E+05	1.82E+06	1.2	0.023
Malha 2	5.52E+05	2.66E+06	1.1	0.023
Malha 3	5.06E+05	2.67E+06	1.1	0.0115

Para as simulações utilizaram-se condições de contorno em todas as faces do domínio. Na entrada do escoamento no tanque foram informadas a vazão mássica de água e a pressão atmosférica para a parte correspondente ao ar, além de uma intensidade turbulenta alta (10%) aplicada para especificar a energia cinética da turbulência e a taxa de dissipação de energia do escoamento. Em todas as paredes (fundo, laterais e defletores) foi aplicada a condição de contorno de não deslizamento e a rugosidade foi considerada nula em todas as situações. Na saída do domínio foi considerada a distribuição de pressão hidrostática para o fluido água e de pressão atmosférica para o ar. Profundidades do escoamento na parte inicial e final foram informadas com relação aos valores obtidos experimentalmente, apresentados em Bombač *et al.* (2017). A simulação considerou o escoamento em condição isotérmica, incompressível, mantendo as propriedades físicas da água constantes, e foi considerado o modelo k-ε de turbulência.

A fim de comparar os resultados com Bombač *et al.* (2015) foram escolhidas quatro seções transversais no tanque central, para os planos $x = 0.60$ m, $x = 1.2$ m, $x = 1.80$ m e $x = 2.40$ m, nomeadas de seções I, II, III e IV (Figura 3), respectivamente, que serão também utilizadas para outras comparações presentes nesse estudo. A Figura 3 também mostra as seções longitudinais V e VI, que representam os planos $y = 1.7$ m e $y = 0.5$ m, respectivamente, que estão presentes em outras análises deste estudo.

Ambas as geometrias foram simuladas para as declividades de 1.67%, 3.33%, 5.00% e 6.67% que correspondem a desníveis entre tanques consecutivos de 0.05 m, 0.10 m, 0.15 m e 0.20 m, respectivamente, e simuladas com vazões de $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1.398 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1.586 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1.765 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Essas vazões representam a condição para que a profundidade média do escoamento no tanque central seja de 1.3 m, reproduzindo as condições de Bombač *et al.* (2017), com variação máxima de 2%.

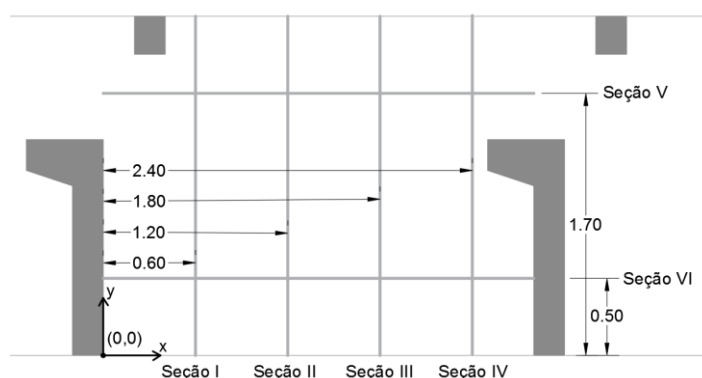


Figura 3.- Posição das seções transversais I, II, III e IV e seções longitudinais V e VI (dimensões em metros).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Validação do modelo

Na **Figura 4** são apresentados os resultados obtidos no presente estudo, para a geometria de referência (Figura 2a), considerando as mesmas condições do trabalho de Bombač *et al.* (2015), a fim de ajustar o modelo utilizado. Os resultados são comparados com os dados experimentais e numéricos de Bombač *et al.* (2015), em relação as velocidades médias na direção longitudinal (V_x) e na direção transversal (V_y) e a energia cinética da turbulência (K').

Analisando os gráficos para velocidades médias na direção longitudinal (V_x) observou-se na posição correspondente a abertura dos defletores uma região com os maiores valores de velocidade, indicando a formação do jato principal, seguido de uma área com valores bem menores de velocidade, entre os defletores maiores do tanque, considerada um local de descanso para os peixes na sua travessia pela escada. Os dados de V_x na região do jato do presente estudo são um pouco superiores aos valores experimentais, sendo que as máximas diferenças foram de 12% na seção I e 23% na seção III. Apesar destas diferenças, na área de descanso os valores obtidos ficaram bem próximos aos experimentais, principalmente na seção III, com uma representação dos valores medidos bem ajustada. A diferença obtida na região do jato pode ser resultado da consideração de paredes e defletores completamente lisos, enquanto Bombač *et al.* (2015) utilizou coeficientes de rugosidade de Manning de $0.01 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$. Para a velocidade média na direção transversal, V_y , e a energia cinética da turbulência, K' , de forma geral pode-se considerar que foram bem representadas pelas simulações realizadas no presente estudo.

Com estes resultados, pode-se considerar que o modelo está representando de forma adequada o escoamento nesta estrutura e se pode avançar para a alteração da geometria conforme condições de interesse para o estudo.

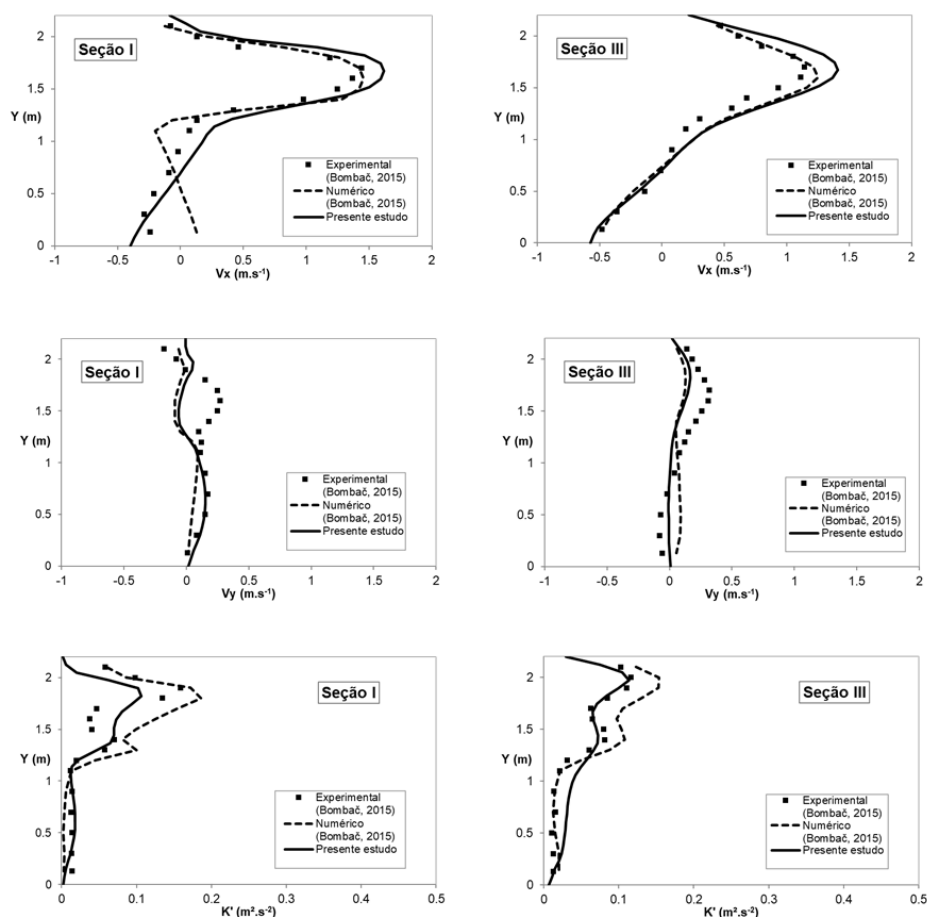


Figura 4.- Comparação das velocidades V_x e V_y e da energia cinética da turbulência, K' , obtidas no presente estudo, para a geometria 1 (Figura 2a) nas seções I e III com declividade $S = 0.0167$ m/m, $Q = 1.000$ m³/s, com os resultados numérico e experimental de Bombač *et al.* (2015), para um plano paralelo ao fundo na posição $z/h = 0.4$ (onde z é a distância a partir do fundo até o plano e h é a profundidade média do escoamento, medida no meio do tanque central).

Influência da Declividade na Geometria 1 - referência

Para a geometria 1 foi analisado nas seções de interesse o impacto da alteração na declividade de fundo, considerando os valores para vazões, declividades e alturas do escoamento propostos por Bombač *et al.* (2017) como condições de contorno da simulação. Os valores obtidos de velocidade longitudinal, V_x , para estas simulações, são apresentados na **Figura 5**, para as seções transversais I, II, III e IV.

Os resultados da **Figura 5** revelam que, com o aumento da declividade, ocorre aumento na velocidade do escoamento no tanque, como se esperava. Na região do jato principal, observam-se os valores máximos de velocidade, sendo maiores na seção mais próxima a entrada da água no tanque (seção I). Na área de descanso, os valores de velocidade para as maiores declividades são superiores em módulo que os obtidos nas menores declividades, mostrando maiores intensidades nas recirculações com o aumento da declividade. Com o aumento de quatro vezes da declividade de fundo da calha, mantendo o escoamento no tanque com 1.3 m de profundidade média, a velocidade máxima em cada seção aumentou entre 76% e 79%. Considerando um mesmo tanque e declividade, quando comparadas as seções I e IV, há uma redução de 19%, aproximadamente, no valor de velocidade máxima. De forma semelhante, foram também analisadas as velocidades médias na direção transversal, V_y , para as quatro seções do tanque (**Figura 6**).

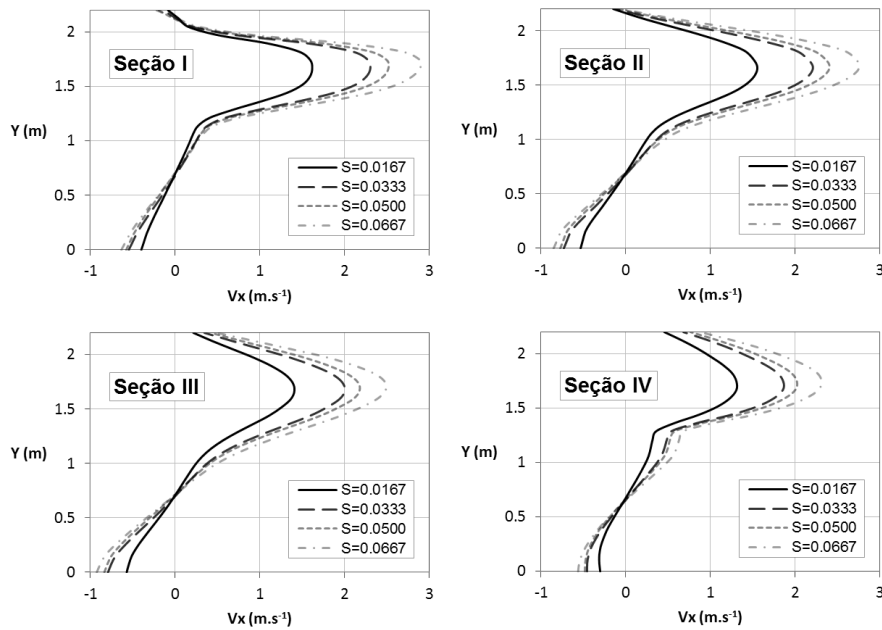


Figura 5.- Resultados obtidos no presente estudo para as componentes de velocidade longitudinal, V_x , em quatro seções transversais, no plano paralelo ao fundo de $z/h = 0.40$, para as quatro declividades testadas.

Analisando a **Figura 6**, quanto maior a declividade maior também a componente das velocidades na direção transversal do escoamento. Na seção IV, para a maior declividade testada, a variação na velocidade transversal, V_y , fica em torno de 0.8 m.s^{-1} . Percebe-se também que as componentes transversais são, de forma geral, menores que as componentes longitudinais.

O comportamento geral do escoamento no tanque central em função da velocidade, para várias declividades, pode ser observado na **Figura 7**. Os vetores de intensidade apresentam a direção de deslocamento do fluido, e a legenda se refere às velocidades médias do escoamento. Para todas as declividades há formação do jato principal e, adjacentes a ele, duas regiões de recirculação, uma maior entre os defletores maiores e outra menor, entre os menores defletores. Com o aumento da declividade, há crescimento das velocidades em todas as áreas do tanque.

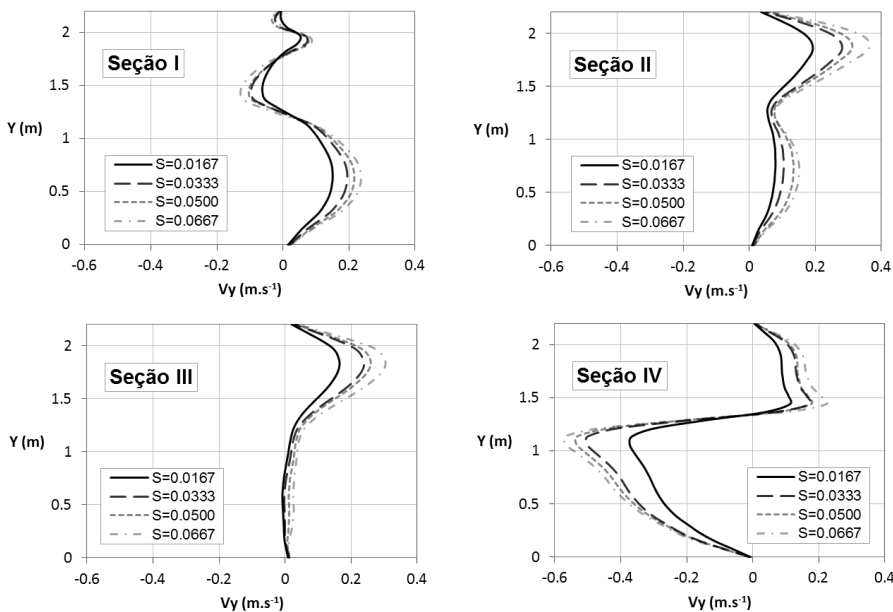


Figura 6.- Resultados obtidos no presente estudo para as componentes de velocidade transversal, V_y , em quatro seções transversais, no plano paralelo ao fundo de $z/h = 0.40$, para as quatro declividades testadas.

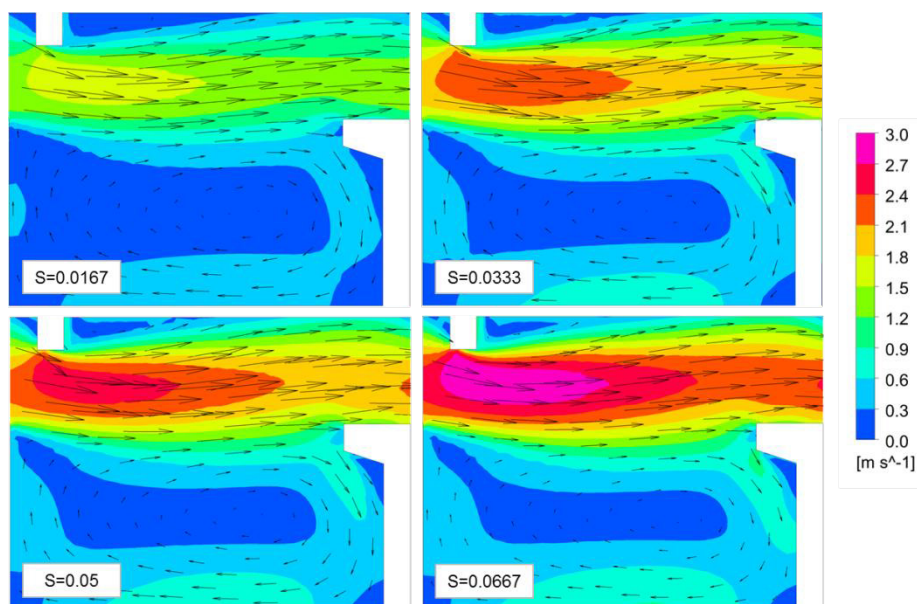


Figura 7.- Campos de velocidades para o plano paralelo ao fundo de $z/h = 0.40$ para as quatro declividades testadas.

A **Figura 8** apresenta dois planos paralelos no tanque central, no sentido longitudinal, com valores de velocidade média e vetores de intensidade do fluxo. O plano em $y = 1.7$ m foi posicionado na região de abertura dos defletores, enquanto o plano em $y = 0.5$ m encontra-se entre os defletores maiores do tanque (conforme Figura 3). Analisando a imagem de velocidade e intensidade para ambas as posições no tanque, os maiores valores de velocidade acontecem em $y = 1.7$ m, que está sob influência do jato principal, principalmente no início do plano, que corresponde a região de entrada do escoamento no tanque. Esse aumento de velocidade é ainda mais significativo para a geometria de maior declividade, onde o comportamento do escoamento se mostra não bidimensional. Observa-se também, no jato principal, o sentido do fluxo pelos vetores acompanha o sentido do escoamento, enquanto em $y = 0.5$ m o sentido da velocidade é contrário ao do escoamento, e em intensidade inferior, caracterizando uma região mais tranquila do tanque, e propiciando uma área de descanso dos peixes durante a travessia da escada. Nas extremidades deste plano, a região mais externa da recirculação apresenta velocidades um pouco mais elevadas, indicando regiões mais próximas aos defletores.

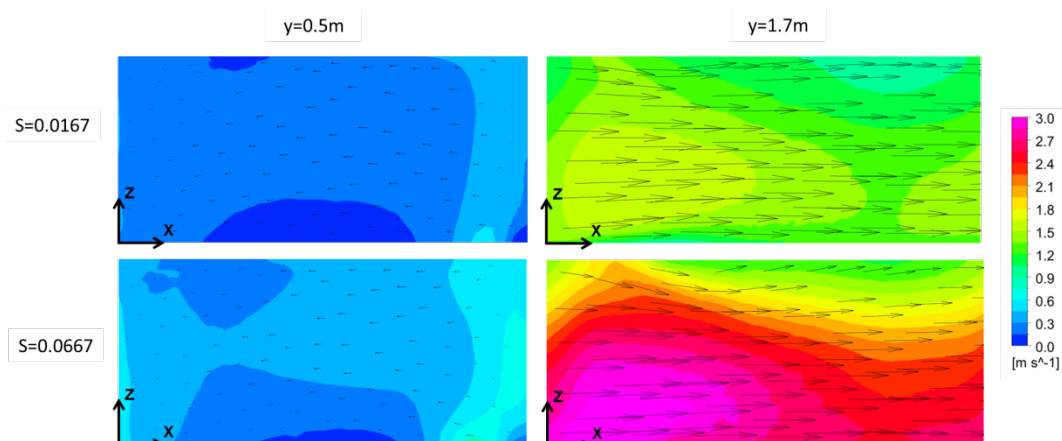


Figura 8.- Comparativo das velocidades em planos verticais longitudinais de $y = 0.5$ m e $y = 1.7$ m, para as declividades de 1.67% e 6.67%.

Influência da Inserção de um elemento cilíndrico no tanque

Em uma segunda análise, foi proposta a inserção de um cilindro após a abertura dos defletores (Figura 2b), consideradas as mesmas declividades (1.67%, 3.33%, 5.00% e 6.67%) e

vazões respectivas ($1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1.398 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1.586 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1.765 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), que resultam na profundidade média do escoamento próximo a 1.3 m.

O cilindro reduz a velocidade na região onde se encontra presente, no caso, a região do jato principal, apresentando influência não muito significativa na área entre defletores maiores (de descanso), como visto na **Figura 9**. A influência do cilindro na maior declividade para a seção I resulta em redução da velocidade máxima na direção longitudinal de $2.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para $2.63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, e na seção III de $2.48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para $2.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, o que representa em ambas as seções, uma condição mais favorável para peixes de menor capacidade natatória.

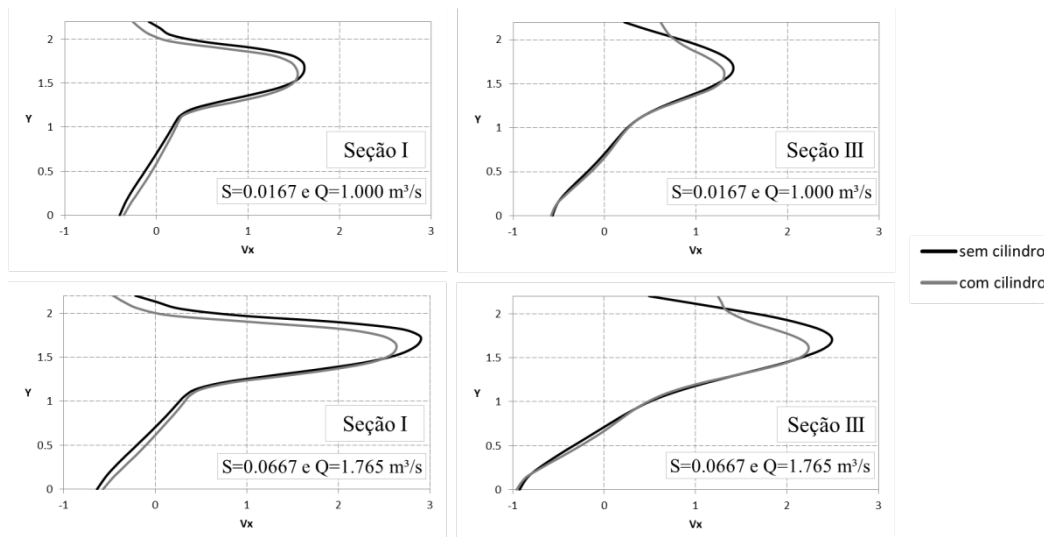


Figura 9.- Comparativo das velocidades longitudinais, V_x , para escadas para peixes com declividade de 1.67% e 6.67% para as geometrias 1 e 2. Valores obtidos para o plano distante do fundo $z/h = 0.4$, nas seções I e III.

A **Figura 10** compara a energia cinética da turbulência nas duas geometrias, para declividades de 1.67% e 6.67%. A inserção do cilindro indicou decréscimo nos valores de energia cinética da turbulência do escoamento, principalmente na região do jato principal, na posição da seção I, região em que o cilindro está presente, indicando novamente uma condição mais favorável para os peixes.

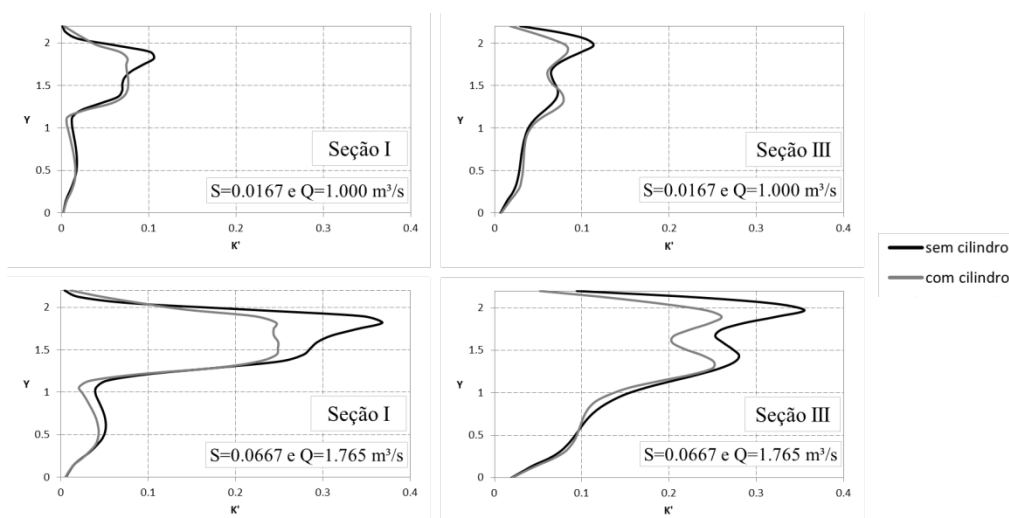


Figura 10.- Comparativo da energia cinética da turbulência, K' , para escadas para peixes com declividade de 1.67% e 6.67% para as geometrias 1 e 2. Valores obtidos para o plano distante do fundo $z/h = 0.4$, nas seções I e III.

Comparações entre geometrias

Buscou-se ainda analisar o comportamento dos campos de velocidade para planos em diferentes alturas do tanque central. A **Figura 11** mostra o comportamento da velocidade resultante para três planos paralelos ao fundo do tanque, distantes do fundo em 20%, 40% e 60% da altura do escoamento, para quatro declividades e vazões, comparando ambas as geometrias. Analisando diferentes posições no tanque central, em diferentes declividades, tem-se uma melhor percepção da dimensão de influência do elemento adicionado.

Como esperado, as maiores velocidades estão nas maiores declividades, e ainda, para a geometria 1, se observam maiores valores para os planos mais próximos do fundo do tanque, e esse aumento é ainda mais perceptível nas declividades mais elevadas. Em relação à geometria com cilindro, as seções distantes do fundo em 60% da altura do escoamento quase não demonstram ser influenciadas pelo cilindro, enquanto a seção de 20% tem redução de velocidades bem característica na região após o cilindro adicionado. Além disso, na declividade de 6.67% da geometria 2, em $z/h = 0.2$, parece que a presença do cilindro associada as altas velocidades resultaram na formação de dois jatos bem característicos após o cilindro. Em relação às áreas de recirculação a região entre os defletores maiores sofre pouca influência da adição do cilindro. Porém, para a região entre os menores defletores, com a presença do cilindro na posição mais próxima do fundo a recirculação é menor, ao mesmo tempo em que, para a posição mais próxima da superfície, a recirculação teve acréscimo de área.

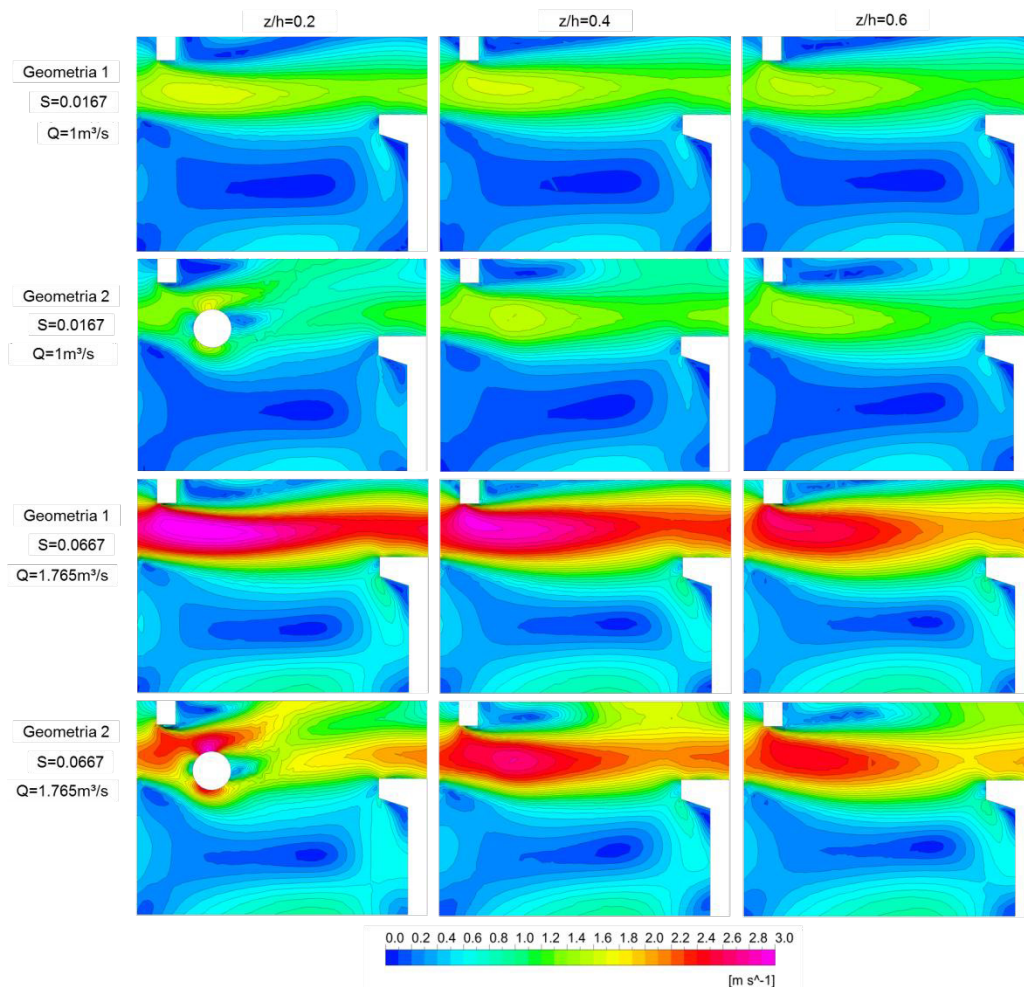


Figura 11.- Comparativo das velocidades para as geometrias 1 e 2 em diferentes planos paralelos ao fundo distantes do mesmo de $z/h = 0.2, 0.4$ e 0.6 , para as declividades de 1.67% e 6.67%.

A **Figura 12** faz uma análise comparativa da variação no comportamento da velocidade longitudinal máxima com o acréscimo do cilindro, revelando ainda a diferença percentual

observada nas quatro seções para as geometrias 1 e 2 com diferentes declividades. A geometria 2 apresenta comportamento semelhante ao da geometria 1 para diferença de velocidade ao longo das seções, como já foi visto na **Figura 9**, e os resultados enfatizam que a inserção do cilindro reduz as velocidades máximas longitudinais. Avaliando o percentual das diferenças de velocidades máximas, se observam maiores valores nas seções transversais II e III, localizadas a jusante da inserção do cilindro, principalmente na geometria de declividade 3.33%, onde as reduções chegam a até 12%.

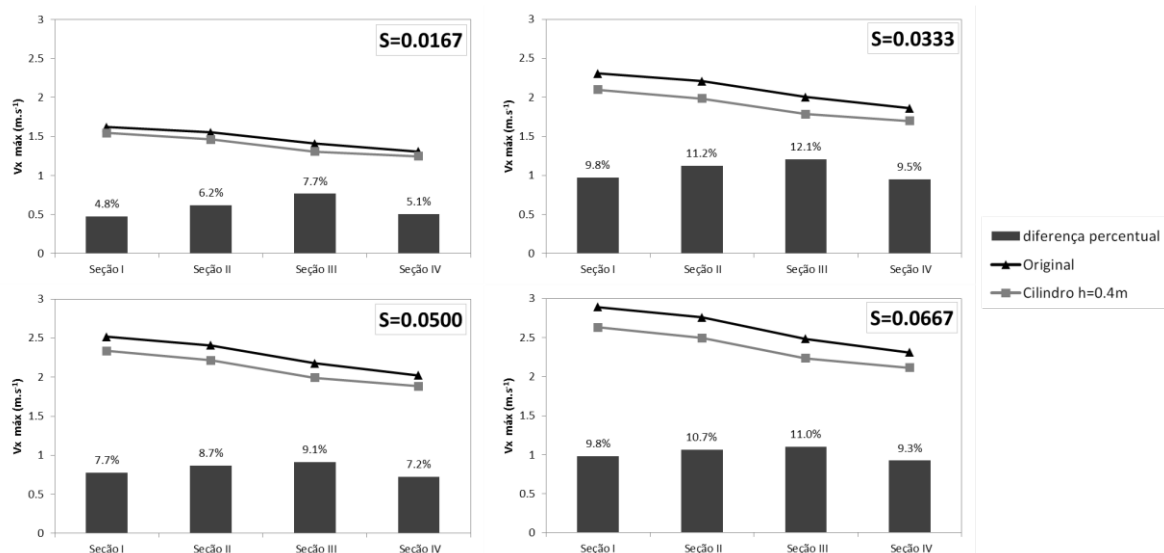


Figura 12.- Comparativo das velocidades longitudinais máximas, V_x máx, para diferentes declividades nas geometrias 1 e 2. Valores obtidos para o plano distante do fundo $z/h = 0.4$.

Os valores médios máximos de velocidade obtidos nas simulações são 1.62, 2.32, 2.55, 2.95 $m.s^{-1}$ para a geometria 1 e 1.60, 2.17, 2.40, 2.71 $m.s^{-1}$ para a geometria 2, para as declividades de 1.67%, 3.33%, 5.00% e 6.67%, respectivamente. Estes valores podem ser comparados com os valores teóricos, obtidos pela relação $V_{máx} = \sqrt{2g\Delta h}$, sendo g a aceleração da gravidade e Δh o desnível entre tanques consecutivos. Os valores médios máximos obtidos sempre foram superiores em relação aos valores teóricos. O aumento em percentual do valor teórico de velocidade máxima para o valor obtido nas simulações, para a geometria 1 é de 63.8%, 65.5%, 48.5%, 48.8%, e para a geometria 2 é de 38.2%, 35.4%, 28.6%, 26.8%, para as declividades de 1.67%, 3.33%, 5.00% e 6.67%, respectivamente. Estudos anteriores também indicaram velocidades na estrutura superiores aos obtidos pela equação teórica, por exemplo, Bombáč *et al.* (2015), verificou que a velocidade máxima teórica é cerca de 50% menor do que os valores obtidos nas suas simulações.

Considerando a velocidade no tanque central da estrutura, para o plano $z/h = 0.4$, tem-se as distribuições de frequência acumulada das velocidades, representada na **Figura 13** para as quatro declividades nas duas geometrias de estudo. Nas geometrias de declividade mais baixa não ocorre grande variação do comportamento analisando ambas as figuras. Já para as geometrias com declividades mais elevadas a diferença das velocidades por área é mais relevante. Para a declividade de 3.33% na geometria 1, 10% da área do tanque tem velocidades maiores a 2 $m.s^{-1}$, e em aproximadamente 25% do tanque a velocidade ultrapassa 1.5 $m.s^{-1}$, enquanto para a geometria 2 velocidades superiores a 2 $m.s^{-1}$ não chegam a 5% do tanque. Para a declividade mais elevadas, na geometria 1, aproximadamente 75% do tanque se mantém abaixo de 2 $m.s^{-1}$ e quase 10% ultrapassa 2.5 $m.s^{-1}$, à medida que na geometria 2 as velocidades se mantêm abaixo de 2 $m.s^{-1}$ em mais de 80% do tanque e ultrapassa 2.5 $m.s^{-1}$ em menos de 5% do tanque. Esses resultados demonstram a redução nos valores de velocidade, em toda a área do plano analisado no tanque, quando se adiciona um elemento cilíndrico após a abertura dos defletores, sendo ainda mais significativa para as declividades mais elevadas.

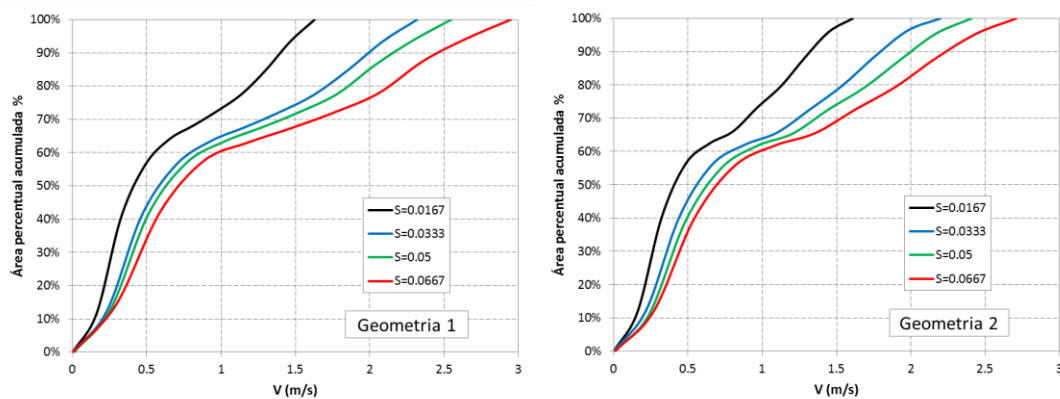


Figura 13.- Comparativo dos valores de velocidades pela área percentual acumulada, em diferentes declividades nas geometrias 1 e 2, obtidos para o plano distante do fundo $z/h = 0.4$.

CONCLUSÕES

Este estudo verificou a influência da alteração da geometria de escadas para peixes do tipo ranhura vertical no escoamento. Foram variadas as declividades de fundo e a inserção de elemento cilíndrico dentro do tanque, mantendo o tamanho dos tanques. A influência no escoamento foi quantificada através da análise das distribuições de velocidade e de energia cinética da turbulência, além da análise do padrão geral do escoamento no tanque. As características do escoamento foram obtidas a partir de simulação numérica do escoamento tridimensional.

As principais conclusões desse trabalho são:

- O modelo pode ser validado a partir da comparação dos resultados obtidos com informações experimentais presentes na literatura.
- Os maiores valores de velocidade acontecem na região de entrada do escoamento no tanque, denominada de jato principal, na geometria de maior declividade a velocidade do escoamento nessa região tem grande aumento, principalmente nas profundidades mais próximas do fundo do tanque, apresentando comportamento não bidimensional. A região entre os defletores maiores se caracteriza por velocidades mais baixas e o sentido do fluxo é contrário ao sentido do escoamento principal, propiciando uma área de descanso dos peixes.
- As máximas velocidades médias foram entre 26% e 66% superiores às obtidas pela equação teórica, sendo maiores as diferenças percentuais para as menores declividades.
- O aumento de quatro vezes na declividade da estrutura resultou em aumentos de até 79% na velocidade longitudinal do escoamento no tanque para as seções analisadas.
- A inserção do cilindro no tanque apresenta grande influência no escoamento na região onde se encontra, reduzindo as velocidades no jato principal, sem afetar consideravelmente a área entre defletores maiores. As reduções na velocidade se deram em todas as seções analisadas, configurando uma situação mais propícia para a travessia dos peixes de menor capacidade natatória. A presença do cilindro, em baixas profundidades e altas declividades, ocasionou a formação de mais um jato após o cilindro e redução de área nas regiões de recirculação entre os menores defletores. As reduções nos percentuais de diferença de velocidades máximas longitudinais, comparando as duas geometrias, para as declividades analisadas, chegaram a até 12% em uma seção a jusante da inserção do cilindro.
- Analisando as distribuições de frequência acumulada das velocidades, comparando a geometria sem o cilindro com a geometria com o cilindro, para as declividades mais elevadas a presença do cilindro resultou em reduções nos valores de velocidade, em toda a área do plano analisado no tanque.
- Comparando ambas as geometrias do estudo há uma redução na energia cinética da turbulência na região do tanque com presença do cilindro, em duas seções transversais analisadas, verificando que a geometria com cilindro tem melhores condições para a passagem dos peixes pela área do jato.

- A simulação numérica do escoamento tridimensional se mostra como uma ferramenta bastante útil para a avaliação dos padrões de escoamento em escadas para peixes com ranhuras verticais. A partir da validação do modelo, pode-se verificar a influência das alterações da geometria no escoamento, permitindo buscar padrões que sejam adequados às espécies de peixes de um determinado local.

AGRADECIMENTO

Este trabalho recebeu o apoio financeiro parcial da CAPES – Brasil, do CNPq e da Propesq/UFRGS.

REFERÊNCIAS

- Alvarez-Vázquez, LJ; Martínez, A; Vázquez-Méndez, ME; Vilar, MA.** (2008). Vertical slot fishways: Mathematical modeling and optimal management. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 218, p. 395-403.
- Baki, A. B. M.; Zhu, D. Z.; Rajaratnam, N.** 2016. “Flow Simulation in a Rock-Ramp Fish Pass”. *J. Hydraulic Eng.* PAGINAS, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001166.
- Bermúdez, M.; Puertas, J.; Cea, L.; Pena, L.; Balairón, L.** (2010). “Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways”. *Ecol. Eng.* 36, 1355–1364, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2010.06.013.
- Bombač, M.; Četina, M.; Novak, G..** (2017). "Study on flow characteristics in vertical slot fishways regarding slot layout optimization". *J. Ecol. Eng.* 107, 126–136, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.07.008
- Bombač, M.; Novak, G.; Mlačnik, J.; Četina, M.** (2015). "Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations". *J. Ecol. Eng.* 84, 476–484, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.09.030
- Calluau D.; Pineau G.; Texier A.; David L.** (2014) "Modification of vertical slot fishway flow with a supplementary cylinder". *Journal of Hydraulic Research*, 52:5, 614-629, DOI: 10.1080/00221686.2014.906000
- Cea, L; Pena, L; Puertas, J; Vázquez-Cendón, ME; Peña, E.** (2007). Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), p. 160-172.
- Marriner, B. A.; Baki, A. B. M.; Zhu, D. Z.; Cooke, S. J.; Katopodis, C.** (2016). “The hydraulics of a vertical slot fishway: a case study on the multi-species Vianney-Legendre fishway in Quebec, Canada”. *Ecol. Eng.* 90, 190–202, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.032>.
- Sanagiotto, D. G.; Bravo, J. M. ; Marques, M. G.** (2016). Simulação do escoamento em escadas para peixes com ranhuras verticais. In: XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Peru. *Libro de artículos do XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 2016*.