

Estudo Experimental das Características do escoamento em Escadas para Peixes do Tipo Ranhura Vertical – Turbulência do escoamento

Daniela Guzzon Sanagiotto

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSM
dsanagiotto@ufsm.br

Antônio N. Pinheiro

CEHIDRO, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa
apinheiro@civil.ist.utl.pt

Luiz Augusto Magalhães Endres, Marcelo Giulian Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS
endres@ufrgs.br; mmarques@iph.ufrgs.br

Recebido: 08/04/11 - revisado: 05/07/11 - aceito: 15/08/11

RESUMO

A construção de barramentos ao longo dos rios causa muitas alterações no meio envolvido. Entre estes impactos, tem-se a formação de uma barreira que impede o deslocamento do habitat aquático, interferindo, principalmente, na reprodução das espécies migratórias. Na tentativa de mitigar este efeito, em muitas barragens, verifica-se a necessidade da implantação de mecanismos de transposição de peixes (MTP). Entre esse MTP têm-se as escadas para peixes que, quando empregadas e projetadas adequadamente, possibilitam a livre circulação das espécies. As escadas/passagens para peixes apresentam diferentes geometrias, de acordo com características natatórias dos peixes, altura do obstáculo e vazões disponíveis. Neste trabalho avaliam-se as características do escoamento em uma escada do tipo ranhura vertical. Realizaram-se ensaios em um modelo com 0,60 m de largura, 0,60 m de profundidade, 9 m de comprimento e 6% de declividade, onde se representa, na escala 1:5, parte da escada para peixes instalada na UHE Igarapava (Minas Gerais). Foram realizadas medições da profundidade do escoamento, das pressões junto ao fundo e das velocidades do escoamento, em uma das bacias da estrutura, para três descargas. A região da ranhura na bacia, onde ocorre a passagem da água entre bacias consecutivas foi estudada detalhadamente, já que representa uma região de passagem obrigatória e onde se esperam as maiores velocidades. Os resultados desse trabalho foram divididos em duas partes: (1) os parâmetros médios do escoamento e (2) características turbulentas do escoamento. Um velocímetro acústico Doppler (ADV) foi utilizado para medir velocidades nas três direções em uma malha tridimensional em uma das bacias do modelo. Neste artigo, que representa a parte 2 desse trabalho, apresentam-se os resultados da avaliação da turbulência do escoamento através de mapas de isolinhas dos parâmetros analisados. Os parâmetros que melhor indicaram os padrões de turbulência do escoamento foram a energia cinética turbulenta e as tensões de Reynolds.

Palavras-chave: escadas para peixes, mecanismos de transposição de peixes, turbulência do escoamento, velocímetro acústico Doppler, tensões de Reynolds, energia cinética turbulenta.

INTRODUÇÃO

Cada parte de um rio constitui o habitat de determinadas espécies de peixe, que aí se estabeleceram devido às características do local: velocidade da corrente, profundidade da água, natureza do leito e das margens, possibilidade de movimentação, regime do rio e qualidade da água. Qualquer mudança nessas características provoca uma alteração

ou redistribuição da população de peixes (CBDB, 1999).

Por esses motivos, durante a fase de planejamento de um barramento deve-se estudar a ictiofauna local, buscando conhecer as suas características reprodutivas, alimentares, natatórias e migratórias, para que sejam tomadas medidas no sentido da conservação da vida aquática.

As medidas para atenuação do impacto no meio aquático incluem a implantação ou planeja-

mento de mecanismos de transposição de peixes (MTP) para a operação durante toda a vida útil do barramento. Os mecanismos de transposição de peixes são estruturas ou sistemas que possibilitam a migração da ictiofauna entre as partes de jusante e montante de uma barragem, sendo muito importantes, principalmente, por permitir a reprodução dos peixes de piracema que se deslocam em direção às cabeceiras dos rios nesse processo. Os MTP, de uma forma geral, podem ser escadas/passagens para peixes, eclusas, elevadores ou sistemas de captura, transporte e soltura.

O conhecimento da capacidade natatória dos peixes e das condições hidráulicas das estruturas é essencial para o desenvolvimento de melhores critérios de projeto para escadas de peixes. Além das velocidades médias, as componentes turbulentas devem ser avaliadas. Somente nos últimos 25 anos foi reconhecido o efeito da turbulência no comportamento dos animais (Tritico, 2009). Acredita-se que existem níveis ótimos de turbulência para os peixes migratórios (Odeh *et al.*, 2002). Lupandin (2005) estudou o efeito da turbulência no comportamento natatório da espécie *Perca fluviatilis*, concluindo que a turbulência pode diminuir os índices de locomoção, afetando com maior severidade os menores indivíduos.

No entanto, os estudos que avaliam a influência da turbulência no comportamento dos peixes, de forma mais abrangente, são escassos (Tritico, 2009). Percebe-se nesse aspecto a necessidade de informações que complementem a respeito dos aspectos de turbulência em passagens para peixes.

ESCADAS PARA PEIXES

Escadas para peixes são, de uma forma geral, canais que permitem a passagem de água através de obstruções ao curso do rio, projetadas para dissipar a energia do escoamento de modo a permitir a passagem dos peixes sem esforço excessivo (Clay, 1995).

As escadas para peixes caracterizam-se por uma sucessão de bacias separadas por septos com soleiras vertedouras, ranhuras verticais ou orifícios submersos, responsáveis por distribuir a carga total em quedas sucessivas (CBDB, 1999).

Na literatura existe uma série de estudos que tratam de características hidráulicas em passagens para peixes, tais como os trabalhos de Rajaratnam *et al.* (1986), Rajaratnam *et al.* (1988), Rajarat-

nam *et al.* (1992), Wu *et al.* (1999), Kim (2001), Pena (2004), Puertas *et al.* (2004), Tarrade *et al.* (2008), entre outros. No Brasil, podem-se citar os trabalhos de Martins (2000), Viana (2005), Coletti (2005), Martins (2005), Sanagiotto (2007), entre outros. Na literatura nacional e internacional, a maior parte dos estudos trata de características médias do escoamento, como o padrão geral do escoamento e os campos de velocidades médias, e poucos são os estudos sobre os padrões turbulentos do escoamento.

TURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO

O comportamento dos peixes depende de características do escoamento, como velocidade, turbulência, pressão, temperatura da água, entre outros fatores, sendo que os indivíduos respondem em função desses parâmetros e da combinação dos mesmos (Pavlov e Skorobogatov, 2009). Segundo esses autores, com o aumento da turbulência tem-se a diminuição da velocidade crítica, da velocidade de cruzeiro e da resistência ao nado para uma dada velocidade, sendo que já se verificou que os peixes escolhem regiões preferenciais quanto à turbulência.

A avaliação de parâmetros de turbulência do escoamento pode ser obtida a partir de séries de dados de velocidade.

A magnitude do vetor velocidade (instantânea ou média) em cada ponto pode ser calculada por:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (1)$$

onde V_x , V_y e V_z são as componentes cartesianas (x, y, z, respectivamente).

As velocidades instantâneas podem ser utilizadas para estimar parâmetros turbulentos. A série de velocidades temporal ($V_i(t)$) pode ser dividida em uma média temporal ($\bar{V}_x, \bar{V}_y, \bar{V}_z$) e componentes turbulentas temporais ($v_{x(t)}', v_{y(t)}', v_{z(t)}'$). As componentes turbulentas temporais geralmente são representadas pelo desvio padrão da série temporal (v_x', v_y', v_z), conforme representado na Figura 1.

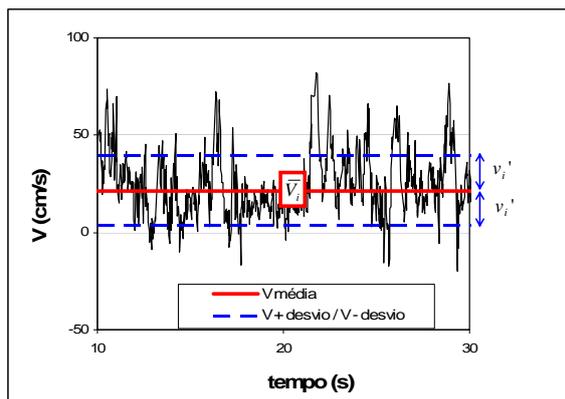


Figura 1 – Representação esquemática da série de velocidades e da decomposição em um valor médio (\bar{V}_i) e da componente turbulenta representada por v_i' .

Assim, a série de velocidades temporal pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} V_x(t) &= \bar{V}_x + v_{x(t)}' \\ V_y(t) &= \bar{V}_y + v_{y(t)}' \\ V_z(t) &= \bar{V}_z + v_{z(t)}' \end{aligned} \quad (2)$$

A energia cinética média (K) é definida por:

$$K = \frac{1}{2} (\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2 + \bar{V}_z^2) \quad (3)$$

A energia cinética turbulenta (k) é dada por:

$$k = \frac{1}{2} (v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2) \quad (4)$$

A intensidade da turbulência (IT) é definida pela razão das flutuações de velocidade (desvio padrão) pela velocidade média, conforme a equação a seguir:

$$IT = \frac{v_i'}{V_i} \quad (5)$$

As tensões de Reynolds resultam das flutuações turbulentas aleatórias. De acordo com Odeh *et al.* (2002), um bom indicativo da severidade da turbulência sobre o peixe são as tensões de Reynolds (τ), que podem ser calculadas para os três planos (paralelo ao fundo, longitudinal e transversal):

$$\begin{aligned} \tau_{XYINS} &= -\rho V_{xins}' V_{yins}' \\ \tau_{XZINS} &= -\rho V_{xins}' V_{zins}' \\ \tau_{YZINS} &= -\rho V_{yins}' V_{zins}' \end{aligned} \quad (6)$$

sendo V_{xins}' , V_{yins}' , V_{zins}' as flutuações instantâneas das componentes de velocidade em relação a média temporal em cada uma das direções x, y, z, respectivamente. A tensão de Reynolds em um ponto é dada pela média das tensões de Reynolds calculadas em cada instante da amostra de velocidades.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E MÉTODOS

Descrição da estrutura

O trabalho experimental foi realizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e reproduz 9 bacias da escada para peixes da UHE de Igarapava na escala geométrica 1:5 (Figura 2).

A estrutura do modelo é composta por um canal com declividade do fundo (S_0) igual a 6%, com aproximadamente 9,0 m de comprimento e 0,60 m de largura (Figuras 2a e 2b). As bacias possuem 0,60 m de largura (B) e 0,60 m de comprimento (L). A Figura 2c apresenta uma vista geral do sistema. A passagem da água entre as bacias consecutivas ocorre por uma ranhura vertical com uma abertura (b_0) de 0,08 m entre um septo maior e outro menor (Figura 2d).

O canal é alimentado por uma tubulação que, com o auxílio de uma bomba operada em conjunto com um inversor de frequência, leva a água de um reservatório inferior até a entrada do canal (parte mais elevada). Desde a parte de entrada da água no canal até o primeiro septo há uma distância de 2 m. Ao longo desse trecho há um tranquilizador com 0,20 m de comprimento, formado por tubos de PVC de 50mm de diâmetro, dispostos em forma de colméia ao longo de toda seção transversal do canal. Após o último septo, tem-se uma distância de 1,50 m até a comporta no final do canal, que verte água para o reservatório inferior. A comporta foi utilizada para regular o nível de jusante de modo a garantir vazão e lâmina d'água semelhantes às encontradas no protótipo na bacia de controle.

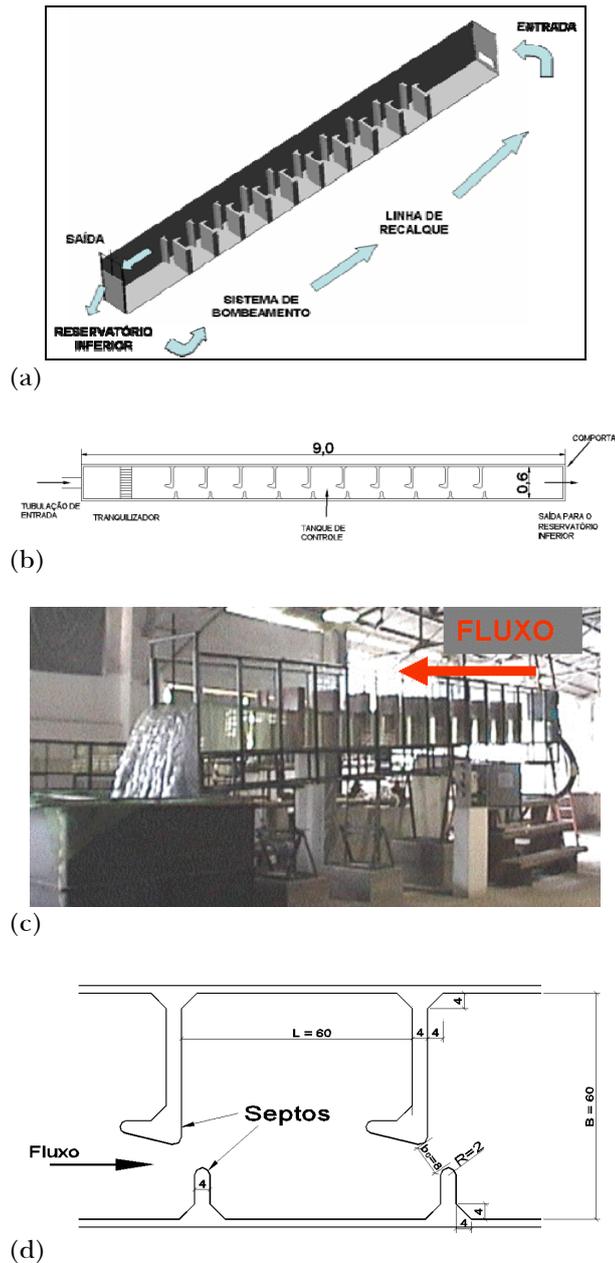


Figura 2 – Modelo reduzido utilizado no estudo: (a) Esquema geral; (b) Planta baixa; (c) Imagem das instalações; (d) Detalhes da estrutura (dimensões em centímetros).

Equipamentos e metodologia

Neste trabalho foram realizadas medições de velocidades em uma malha tridimensional na bacia central do canal, considerada a bacia de controle. Realizaram-se medições de velocidades em 5 planos paralelos ao fundo do canal, um deles próximo ao fundo (1 cm do fundo), e os outros afasta-

dos do fundo 10%, 25%, 50% e 80% da profundidade média do escoamento (h_m). Em cada um desses planos realizaram-se, no mínimo, medições em 130 pontos (Figura 3a), totalizando 700 pontos de medição na bacia, para cada descarga. Um estudo complementar foi realizado na região da ranhura vertical, sendo esta uma região crítica na passagem dos peixes e, provavelmente, onde ocorre a velocidade máxima. A Figura 3b mostra o detalhe em planta da região da ranhura, sendo que ali foram medidas velocidades nas seguintes profundidades (a partir do fundo): 1 cm, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% da profundidade média do escoamento.

As medições de velocidade foram realizadas com um velocímetro acústico Doppler (ADV) da marca Sontek, modelo Sontek/YSI 16-MHz Micro-ADV (Figura 4). A partir de ensaios preliminares optou-se pela realização dos ensaios com a faixa nominal de ± 250 cm/s, que corresponde a uma máxima componente horizontal de ± 360 cm/s e a uma máxima vertical de ± 90 cm/s. A resolução desse equipamento é de 0,01 cm/s e a acurácia é de 1% da faixa nominal. A aquisição dos dados foi realizada utilizando o programa HorizonADV, recomendado pelo fabricante do ADV (HorizonADV, 2005). A frequência de amostragem foi de 50 Hz, com aquisições de 90 s em cada posição, totalizando 4500 dados por ponto. Durante a realização dos ensaios, foi medida a temperatura da água, sendo esta informada no programa de aquisição de dados. A salinidade não foi medida, sendo considerada igual a zero para todos os ensaios realizados.

Para o posicionamento do equipamento no interior da bacia de medição construiu-se um suporte móvel sobre o canal que permite que o ADV seja deslocado para qualquer posição de medição.

O sistema de medição Doppler apresenta um ruído que é inerente ao processo. De acordo com recomendações dos fabricantes, devem ser seguidos alguns cuidados durante a realização dos ensaios. O fabricante (Sontek, 2001) alerta que, além da existência de ruído branco no sinal, inerente ao processo de medição, algumas condições do escoamento, como aeração e turbulência elevada, podem prejudicar o sinal, sendo recomendada a aplicação de um filtro às séries de dados.

A partir da avaliação de diferentes filtros, optou-se pela utilização do filtro PSTM (Phase-Space Thresholding Method), desenvolvido por Goring e Nikora (2002) e modificado e implementado no programa WinADV por Wahl (2003). Observou-se que a aplicação desses filtros nos dados, retira da série de dados os “spikes” e, ao mesmo tempo, man-

tém um grande percentual dos dados na amostra, na maior parte das vezes superior a 80% do total. Uma análise mais detalhada da escolha do filtro pode ser consultada em Sanagiotto (2007).

tam os valores mínimo e máximo de projeto para a escada da UHE de Igarapava.

Quadro 1 – Resumo das condições do escoamento nas medições realizadas.

Condição	1	2	3
Vazão no modelo 1:5 (m ³ /s)	0,02165	0,02451	0,02916
Vazão Correspondente em protótipo (m ³ /s)	1,21	1,37	1,63
h _m (m) no modelo	0,380	0,398	0,470
Δh (m) no modelo	0,04	0,04	0,04
Fr*	0,35	0,36	0,35

* $Fr = V/\sqrt{gh_m}$, onde V é a velocidade média medida na seção da ranhura e h_m é profundidade média do escoamento.

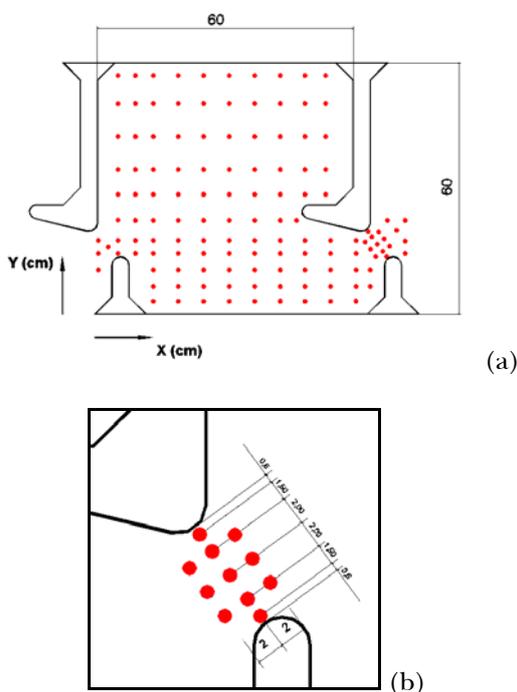


Figura 3 – Pontos de medição de velocidade: (a) na bacia; (b) detalhe na região da ranhura (dimensões em cm).



Figura 4 – Velocímetro acústico Doppler (Fonte: Sontek, 2008)

Condições dos Ensaios

Foram realizados ensaios para três vazões, de acordo com as condições apresentadas no Quadro 1. A menor vazão considerada representa a condição de medições realizadas em protótipo, por Viana (2005), e as outras duas descargas represen-

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Energia Cinética Média(K)

A figura 5 mostra o comportamento da energia cinética média para alguns dos planos avaliados para uma das descargas.

A energia cinética média está relacionada com a componente média das velocidades. Observam-se, para todas as vazões e em todos os planos paralelos ao fundo, as diferentes regiões do escoamento: valores maiores de energia cinética média no caminho do jato principal e valores menores nas regiões de recirculação do fluxo. Nos planos mais próximos do fundo os maiores valores delimitam a região do jato principal, que tem uma curvatura maior, tendendo a entrar na região da grande recirculação. Para os planos mais superficiais, tem-se definido o jato principal por um caminho mais direto entre ranhuras consecutivas.

Para comparar os campos de energia cinética média para as diferentes vazões, além da avaliação visual, foi calculado, para cada plano de medição, o valor médio deste parâmetro. A Figura 6 mostra os valores médios de energia cinética média para os diferentes planos e vazões. Observa-se que para os diferentes planos paralelos ao fundo, com exceção do plano mais próximo ao fundo, os valores médios de energia cinética média, para as diferentes vazões, apresentam um mesmo comportamento, com valo-

res maiores associados a planos mais próximos da superfície. O valor médio desse parâmetro no plano mais superficial (80% h_m) é 20% superior ao valor correspondente ao plano situado a 10% h_m . O aumento da vazão parece não estar associado ao aumento do valor médio da energia cinética média, embora, para a menor descarga avaliada, os valores sejam inferiores. Os valores para as outras duas vazões estão muito próximos.

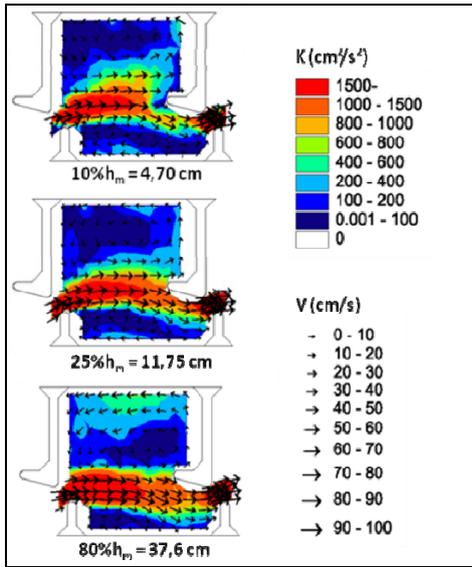


Figura 5 – Campo de energia cinética média para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

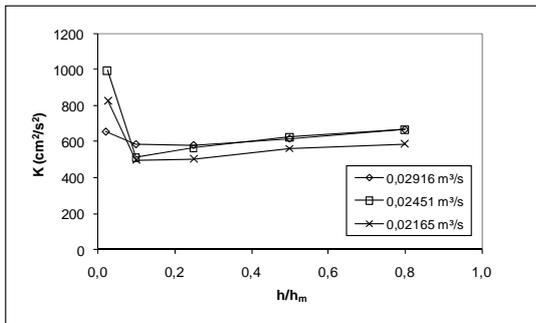


Figura 6 – Valores médios de energia cinética média para cada plano paralelo ao fundo.

O comportamento dos valores médios para o plano distante 1 cm do fundo reflete as dificuldades de medições em regiões próximas a fronteiras, fora da faixa recomendada pelo fabricante, sendo que esses valores, provavelmente, estão superestimados.

Energia Cinética Turbulenta (k)

A energia cinética turbulenta (k) é apresentada sob a forma gráfica de seus campos na Figura 7. Os maiores valores de k concentram-se no escoamento principal, onde as velocidades são maiores. Percebe-se que a influência do jato é maior para planos mais afastados do fundo. Por outro lado nas regiões de recirculação este parâmetro é consideravelmente menor. Observa-se que na zona da recirculação maior (lado esquerdo do jato principal), próximo ao defletor de montante, são encontrados os menores valores de k na bacia, que indicam explicar o comportamento observado pelos peixes ao longo do percurso, utilizando essa região para descansar e para aproximação e passagem pela ranhura. Este fato foi observado em algumas avaliações experimentais, de caráter qualitativo, realizadas com peixes em um modelo na escala 1:20 e por Viana (2005), também em um estudo com peixes em um modelo na escala 1:10.

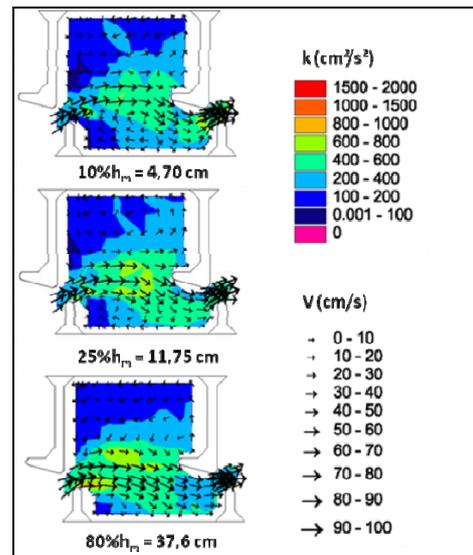


Figura 7 – Campo de energia cinética turbulenta para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

A Figura 8 mostra os valores médios de energia cinética turbulenta para os diferentes planos e vazões. Verifica-se que há uma tendência do aumento do valor médio da energia cinética turbulenta para os planos mais distantes do fundo e para as maiores descargas.

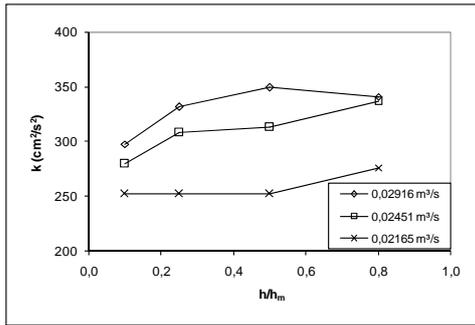


Figura 8 – Valores médios de energia cinética turbulenta para cada plano paralelo ao fundo.

A Figura 9 mostra os campos de energia cinética turbulenta na seção da ranhura. Observam-se os maiores valores de energia cinética turbulenta junto ao defletor menor e mais próximo do fundo.

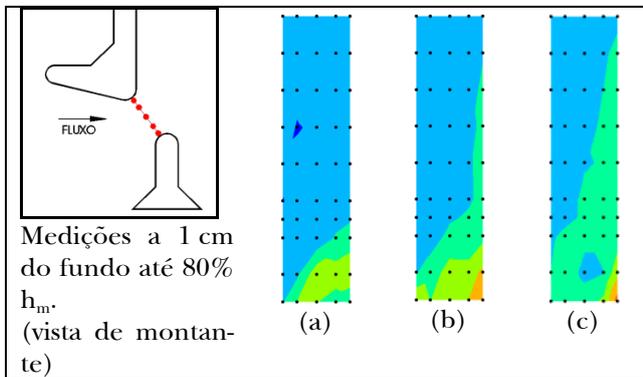


Figura 9 – Campo de energia cinética turbulenta na seção da ranhura para: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ (legenda de valores da Figura 7).

Intensidade da turbulência

Os mapas apresentados na Figura 10 representam o comportamento da intensidade da turbulência nos planos paralelos ao fundo, para uma das vazões ensaiadas. Geralmente os valores da intensidade da turbulência são menores nas regiões das velocidades de maior magnitude e mais significativos nas regiões de recirculação do escoamento. Isso porque nas regiões de recirculação, onde as velocidades médias são menores, estas se tornam pouco expressivas em relação às flutuações de velocidades, que em alguns casos são maiores que o valor médio. As regiões de recirculações, onde os valores de intensidade da turbulência são elevados, caracterizam

se por escoamentos de pequeno deslocamento, mas com agitação constante, enquanto que na região do jato, tem-se um escoamento de sentido preferencial, de velocidades mais elevadas e menores flutuações relativas.

A Figura 11 apresenta os valores médios de intensidade da turbulência para cada plano, para as diferentes vazões. Observa-se que os valores médios da intensidade da turbulência encontram-se entre 1,2 e 1,6, sem poder se identificar um padrão relacionado à vazão ou a profundidade do plano analisado.

A análise dos campos de intensidade da turbulência na seção da ranhura mostra um comportamento semelhante independente da descarga, com pouca variação dos valores ao longo da profundidade, predominando intensidades da turbulência com valores entre 0,3 e 0,4.

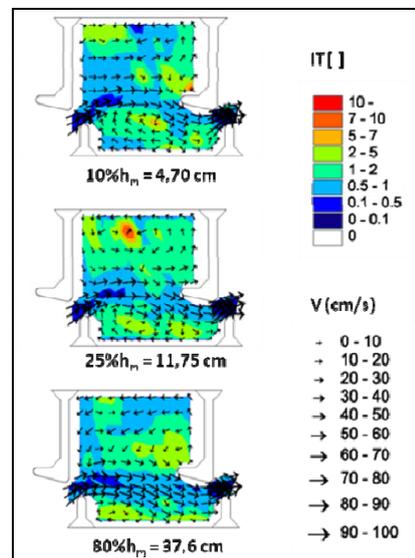


Figura 10 – Campos de intensidade da turbulência para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

Em cada ponto de medição de velocidade, avaliou-se o valor médio das tensões de Reynolds instantâneas. A Figura 12 apresenta as isolinhas dos valores médios de tensões de Reynolds no plano xy (plano paralelo ao fundo). Este parâmetro é maior na região do escoamento principal, apresenta valores negativos na zona adjacente ao jato e na grande recirculação é aproximadamente nulo. O mesmo comportamento é observado em todos os planos com um pequeno aumento na zona de valores negativos para planos mais afastados do fundo. Os baixos valores de tensões de Reynolds na região da grande

recirculação indicam essa área como região de descanso dos peixes ao longo da passagem pela estrutura, o que pode ser observado na visualização do escoamento. As maiores magnitudes das tensões de Reynolds observadas chegam a 30 N/m^2 , ocorrendo em pequenas regiões. Considerando o caminho do jato principal, pode-se dizer que, na maior parte do tempo, o peixe teria que se adequar a valores de tensões de Reynolds entre 5 e 20 N/m^2 .

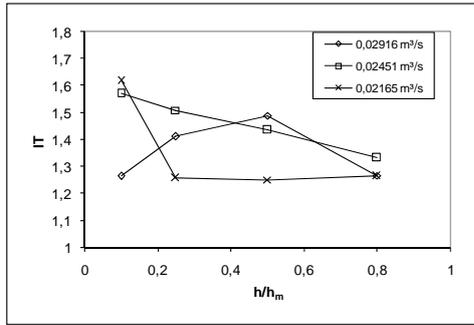


Figura 11 – Valores médios de intensidade da turbulência para cada plano paralelo ao fundo. Tensões de Reynolds

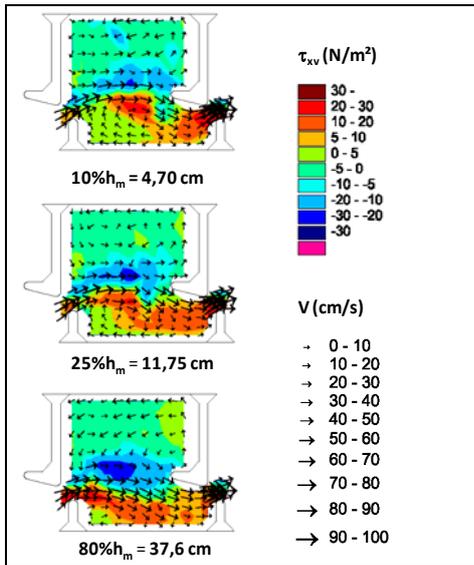


Figura 12 – Campos de tensões de Reynolds para $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ em planos paralelos ao fundo (distâncias em relação ao fundo do canal).

A Figura 13 apresenta os valores médios em cada plano das tensões de Reynolds para cada um dos planos e para as diferentes vazões avaliadas. Esses valores ficam, na grande maioria, entre -1 e

1 N/m^2 , sem identificação de um comportamento associado às profundidades ou descargas, para as situações investigadas.

A Figura 14 apresenta as tensões de Reynolds no plano xy , obtidas nas medições realizadas na seção da ranhura. Evidencia-se o comportamento observado nos campos paralelos ao fundo com valores de tensões de Reynolds na região do jato principal, na grande maioria, entre 5 e 20 N/m^2 . Junto ao fundo os valores são maiores, chegando a exceder 30 N/m^2 , mas conforme as limitações da medição pelo efeito Doppler próximo as fronteiras, acredita-se que esses valores estão superestimados. Analisando a seção da ranhura observa-se, concordando com as magnitudes da velocidade e dos demais parâmetros turbulentos, que as tensões de Reynolds são maiores junto ao defletor menor, correspondendo à região de choque direto do jato principal, enquanto que ao lado do defletor maior, estes valores são atenuados.

Odeh *et al.* (2002) apontaram que para valores de tensões de Reynolds superiores a 30 N/m^2 os peixes juvenis ficam suscetíveis a predadores. Considerando a escala de transposição de resultados, observa-se na estrutura real valores de tensões de Reynolds na maior parte da bacia na ordem de 25 N/m^2 (em valor absoluto), mas com regiões isoladas, cuja passagem é obrigatória, de até 150 N/m^2 . Percebe-se que os valores são bastante superiores aos limites colocados por Odeh *et al.* (2002) associados a prejuízos para os peixes juvenis. No entanto, ressalta-se que há a necessidade de estudos voltados para o comportamento da ictiofauna frente à turbulência do escoamento.

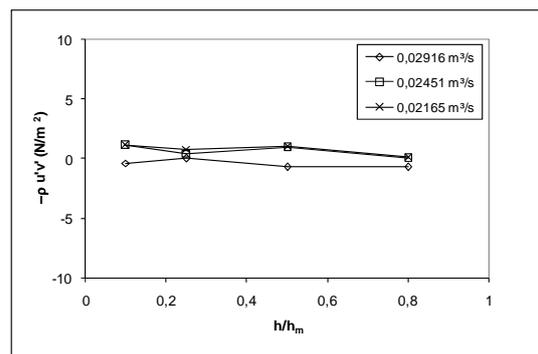


Figura 13 –Valores médios das tensões de Reynolds no plano xy para cada plano paralelo ao fundo

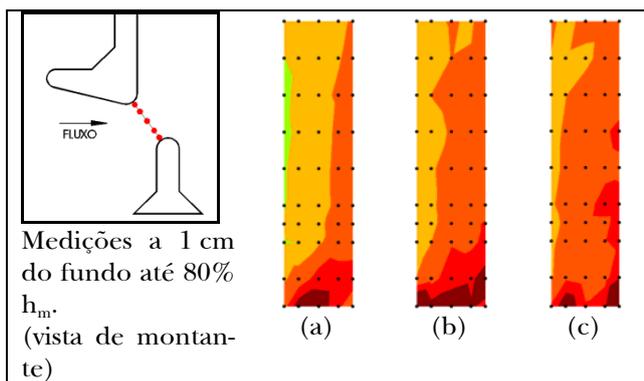


Figura 14 – Campo de tensões de Reynolds na seção da ranhura para: (a) $Q=0,02165 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) $Q=0,02451 \text{ m}^3/\text{s}$; (c) $Q=0,02916 \text{ m}^3/\text{s}$ (legenda de valores da Figura 12).

A extensão da escada para peixes também é um elemento importante. À medida que são impostas situações de desconforto durante a trajetória, a repetição prolongada dessas condições pode levar os peixes à exaustão.

CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar alguns parâmetros da turbulência do escoamento em escadas para peixes. A avaliação dos campos de parâmetros relacionados à turbulência do escoamento representa muito bem a separação de duas zonas: a região do jato principal e as duas regiões de recirculação, presentes nas bacias de escadas para peixes com ranhuras verticais.

Os valores de energia cinética média no modelo investigado da escada para peixes com ranhura vertical chegam até $1500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ($0,75 \text{ m}^2/\text{s}^2$ em escala real), na região do jato principal. A energia cinética turbulenta nas bacias pode ser caracterizada por valores de até $1000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ($0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ em escala real) na região do jato principal, e nas regiões de recirculação, por valores que variam entre 100 e $400 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ (entre 0,05 e $0,2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ em escala real).

Observaram-se os menores valores da intensidade da turbulência nas regiões das velocidades de maior magnitude (região do jato principal) e maiores valores de intensidade da turbulência nas regiões de recirculação do escoamento, como também verificado por Pena (2004). Como representa uma flu-

tuação relativa à velocidade média em cada ponto, acredita-se que não seja um bom indicativo para representar a turbulência, quando utilizado isoladamente, principalmente em um estudo onde existem componentes biológicas envolvidas. Isso porque, ao analisar um determinado valor isolado de intensidade da turbulência, não se tem as grandezas reais do valor médio e da flutuação, mas apenas da relação entre ambas.

O comportamento do campo de tensões de Reynolds no plano xy mostra, como observado para a energia cinética turbulenta, valores mais elevados na passagem pela ranhura e ao longo do jato principal. Adjacente a esses valores mais elevados, tem-se uma região pequena de transição, com valores menores, e logo outra região de grandes magnitudes de tensões de Reynolds, no entanto, de sinal contrário. Na região da grande recirculação, a maior parte da área apresenta valores entre $-5 \text{ N}/\text{m}^2$ e zero ($-25 \text{ N}/\text{m}^2$ e zero em escala real), confirmando que na região da grande recirculação têm-se as melhores condições para o descanso dos peixes. As maiores magnitudes das tensões de Reynolds observadas chegam a $30 \text{ N}/\text{m}^2$ ($150 \text{ N}/\text{m}^2$ em escala real), ocorrendo em pequenas regiões. No caminho do jato principal, grande parte do mesmo apresenta valores entre 5 e $20 \text{ N}/\text{m}^2$ ($25 \text{ N}/\text{m}^2$ e $100 \text{ N}/\text{m}^2$ escala real).

Os parâmetros indicativos da turbulência apresentados neste trabalho podem ser confrontados com estudos que analisam o comportamento biológico frente a diferentes níveis de turbulência, como realizado por Lupandin (2005), Tritico (2009) e Silva *et al.* (2010). Estudos que avaliem o efeito da turbulência do escoamento sobre a ictiofauna brasileira, comparados com o comportamento dos campos de velocidade e de parâmetros indicativos da turbulência do escoamento, permitiriam a escolha de geometrias mais adequadas a estas espécies.

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho também são úteis para a calibração de modelos numéricos, que permitem a simulação do escoamento para geometrias diferentes das avaliadas em modelo. Essas avaliações possibilitam maior segurança na análise e escolha de determinada escada para peixes, com maior confiança na caracterização hidráulica (padrões médios e turbulentos) e adequação com as exigências da ictiofauna. Por isso, estudos futuros devem ampliar o conhecimento sobre aspectos da turbulência do escoamento em conjunto com o comportamento dos peixes frente a esses indicadores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES, pela concessão da bolsa de estudos de doutorado da primeira autora e ao CNPq pelo apoio no projeto.

REFERÊNCIAS

- CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. (1999). Barragens e Peixes – Análise crítica e recomendações. Boletim 116, 115p.
- CLAY, C. H. Design of fishways and other fish facilities (1995). (2nd ed). Boca Raton, Lewis, 248p.
- COLETTI, J. Z. (2005). Características do escoamento ao longo de uma escada de peixes do tipo ranhura vertical. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS.
- GORING, D. G.; NIKORA, V. I. (2002). "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 1, 117-126.
- HORIZONADV (2005). HorizonADV, User Guide, Sontek, 32p.
- KIM, J. H. (2001). Hydraulic characteristics by weir type in a pool-weir fishway. Ecological Engineering, V. 16, Issue 3, 425-433.
- LUPANDIN, A. I. (2005). Effect of flow turbulence on swimming speed of fish. Biology Bulletin, 32(5): 461-466. Translated from Izvestiya Akademii Nauk, Seriya Biologicheskaya, 5:558-565.
- MARTINS, S. L. (2000) Sistemas para a Transposição dos Peixes. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP.
- MARTINS, S. L. (2005). Sistemas para a Transposição de Peixes Neotropicais Potamódromos. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP.
- ODEH, M. et al. U.S. Geological Survey, Glenn F. Cada - Oak Ridge National Laboratory, 2002, Evaluation Of The Effects Of Turbulence On The Behavior Of Migratory Fish, Final Report 2002, Report to Bonneville Power Administration, Contract No. 00000022, Project No. 200005700, 55 electronic pages (BPA Report DOE/BP-00000022-1).
- PAVLOV, D. S., SKOROBOGATOV, M. A. (2009). Effect of the Flow Turbulence on the Movement Pattern of the Caudal Fin in Fish. Doklady Biological Sciences, Vol. 428, pp. 464-466.
- PENA, L. (2004). Estudio hidráulico en modelo de escalas de peixes de fenda vertical e de fenda profunda aliñadas. Aproximación á avaliación experimental da enerxía cinética turbulenta. Tese de Doutoramento, Programa de Doutoramento de Enxeñaría Civil, Universidade da Coruña.
- PUERTAS, J.; PENA, L.; TEJEIRO, T. (2004). "Experimental approach to the hydraulic of vertical slot". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 1, 1-14, 2004.
- RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C. (1986). "Hydraulics of vertical slot fishways". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 10, 909-927.
- RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C e MAINALI, A. (1988). Plunging and Stream Flow in Pool and Weir Fishways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114, 939-944.
- RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C., SOLANKI, S. (1992). "New design for vertical slot fishways". Canadian Journal of Civil Engineering. Volume 19, Número 3, 402-414.
- SANAGIOTTO, D. G. (2007). Análise da macroturbulência do escoamento em escadas para peixes por bacias sucessivas. Tese de doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS.
- SILVA, A.T., SANTOS, J.M., FERREIRA, M.T., PINHEIRO, A.N., KATOPODIS, C. (2010). Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in a experimental pool-type fishway. River Research and Applications. DOI: 10.1002/rra.21363.
- SONTEK. (2001). Sontek ADVField Acoustic Doppler Velocimeter. Technical Documentation. San Diego, USA.
- SONTEK. (2008). MicroADV Expanded Description. San Diego, USA.
- TARRADE, L., TEXIER, A., DAVID, L., LARINIER, M. (2008). Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. Hydrobiologia. 609, 177-188.
- TRITICO, H. M. (2009) The effects of turbulence on habitat selection and swimming kinematics of fishes. Tese de doutorado, Civil and Environmental Engineering and Natural Resources and Environment, University of Michigan.
- VIANA, E.M.F. (2005). Mapeamento do Campo de Velocidades em Mecanismos de Transposição de Peixes do Tipo Slot Vertical em Diferentes Escalas, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG.
- WAHL, T. L. (2003). Discussion of "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data" by D. G. Goring & V. I. Nikora. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 6, 484-487.
- WU, S.; RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C. (1999). "Structure of flow in vertical slot fishway". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 4, 351-360.

Experimental Study of Flow Patterns in Vertical Slot Fishways – Turbulent Flow

ABSTRACT

Dam construction along the rivers affects the biological communities by changing the aquatic habitat, interfering in fish movements and causing serious restrictions to the reproduction of migratory species. In an attempt to reduce these effects, many dams include fishways to help species maintain their life cycles. Fishways can be of various types according to the obstacle height, fish species and available discharges. In this paper, flow patterns in a vertical slot fishway were studied. An experimental arrangement consisting of a 0.60 m wide, 0.60 m deep and 9 m long flume divided into nine pools was evaluated. This model represents part of the fishway installed at the Igarapava Hydropower Plant in Minas Gerais (Brazil). Measurements were carried out on the flow depth, bottom pressure and flow velocity in one of the pools for three discharges. The slot region between consecutive pools was studied in detail since it is an obligatory passage and it is where the highest velocities are expected. The results of this paper were divided in two parts: (1) the average flow parameters and (2) the characteristics of the turbulent flow. An acoustic Doppler velocimeter (ADV) was used to measure three direction velocities in a three-dimensional mesh in one pool of the model. In this article, which represents the second part of this work, results show turbulence patterns through isoline maps of the evaluated parameters. The parameters that best show the patterns of flow turbulence were the turbulent kinetic energy and Reynolds shear stress.

Key-words: fishways, fish passes, turbulence, acoustic Doppler velocimeter, Reynolds' shear stress, turbulence kinetic energy.