

Caracterização de Velocidades Médias e Padrões de Turbulência do Escoamento em Escadas para Peixes por Bacias Sucessivas com Orifícios de Fundo

Daniela Guzzon Sanagiotto

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSM – Santa Maria, RS
dsanagiotto@ufsm.br

António N. Pinheiro

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

Marcelo Giulian Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS – Porto Alegre, RS
mmarques@iph.ufrgs.br

Recebido: 16/02/11 - revisado: 04/07/11 - aceito: 03/01/12

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 dos peixes interferindo principalmente na reprodução das espécies migratórias. Na tentativa de mitigar este efeito, em algumas situações, verifica-se a necessidade da implantação de mecanismos de transposição de peixes (MTP). Entre os MTP têm-se as escadas para peixes que, quando empregadas e projetadas adequadamente, possibilitam a livre circulação das espécies. Neste trabalho avaliam-se as características do escoamento em uma escada para peixes do tipo bacias sucessivas com orifícios de fundo por meio de estudo em modelo físico. Realizaram-se medições de velocidade com um velocímetro acústico Doppler (ADV) em uma bacia representativa desta estrutura. A partir das medições pode-se definir o padrão geral do escoamento e caracterizar a turbulência através da energia cinética turbulenta e das tensões de Reynolds.

Palavras-chave: Mecanismo de transposição de peixes; Escada para peixes; Turbulência do escoamento; Tensões de Reynolds; Energia cinética turbulenta.

INTRODUÇÃO

A migração, em sua forma mais simples, é o deslocamento do peixe (seja para alimentação ou reprodução) e seu posterior retorno. Com a construção de reservatórios e outras estruturas de barramento esse percurso é interrompido. Com o objetivo de atenuar esse efeito negativo são implantados mecanismos de transposição de peixes (MTP).

Os MTP são estruturas ou sistemas que possibilitam a migração da ictiofauna entre as partes de jusante e montante de uma barragem, sendo importantes, principalmente, por permitir a reprodução dos peixes de piracema, que se deslocam em direção às cabeceiras dos rios. Os MTP incluem escadas para peixes, eclusas, elevadores ou sistemas de captura, transporte e soltura.

Verifica-se um universo complexo englobando os MTP, com um cenário de caráter multidisciplinar que inclui condicionantes hidráulicos, biológicos, técnicos e econômicos. Embora na literatura verifiquem-se vários estudos nesse contexto, ainda restam questões que carecem de bases mais consolidadas, como por exemplo: Quais as melhores estruturas para cada espécie de peixe? Quais as variáveis mais importantes na seleção de MTP? Como os peixes são afetados pela turbulência do escoamento?

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. Segundo Tritico (2009), somente nos últimos 25 anos é que se reconheceu o efeito da turbulência no comportamento dos ani-

mais. Segundo Odeh *et al.* (2002), as forças associadas com pequenos vórtices (menores do que as dimensões dos peixes) podem causar danos localizados, como perdas de escamas. Já a permanência dos peixes em regiões de vórtices maiores (várias vezes a dimensão do peixe) poderia resultar na desorientação e redução da capacidade natatória, deixando-os mais suscetíveis a predadores (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. Este autor verificou a desorientação dos indivíduos quando a dimensão dos vórtices e o comprimento do peixe eram semelhantes.

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 venham complementar a respeito dos aspectos de turbulência em passagens para peixes.

Neste contexto encontra-se a necessidade de novos estudos em modelos de MTP, através da caracterização hidráulica, avaliando além das componentes médias do escoamento, as grandezas turbulentas e de alguma maneira relacionando estes fatores com as preferências biológicas.

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).

Nas passagens para peixes por bacias sucessivas com descarregadores de superfície o escoamento passa de uma bacia a outra, sobre a soleira vertedoura que separa bacias consecutivas. A utilização deste mecanismo de transposição depende das características natatórias do peixe: o salmão e a truta podem saltar de uma bacia a outra, enquanto que peixes que não possuem esta capacidade poderão

ter que utilizar a sua velocidade de explosão ('burst') para nadar no fluxo sobre o vertedouro (Rajaratnam *et al.*, 1988). Se a velocidade do escoamento sobre o descarregador de superfície exceder a velocidade crítica de migração contra o fluxo, o peixe não conseguirá realizar a transposição. Outras características hidráulicas importantes, tais como formação de jatos, turbilhões e recirculações, podem interferir no comportamento migratório dos peixes (Kim, 2001).

As primeiras escadas para peixes construídas foram do tipo soleira vertedoura e, ainda hoje, estas são utilizadas, algumas vezes, com a combinação de construção de orifícios nas paredes do vertedouro (Rajaratnam *et al.*, 1988). Este tipo de estrutura é bastante sensível às variações de nível, sendo que um pequeno aumento na carga hidráulica provoca acréscimos significativos na velocidade e muitas vezes pode impedir a transposição dos peixes (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), Rajaratnam *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

Segundo Pavlov e Skorobogatov (2009), o comportamento dos peixes depende da velocidade, turbulência e pressão do escoamento, além de outros fatores, como temperatura da água. 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.

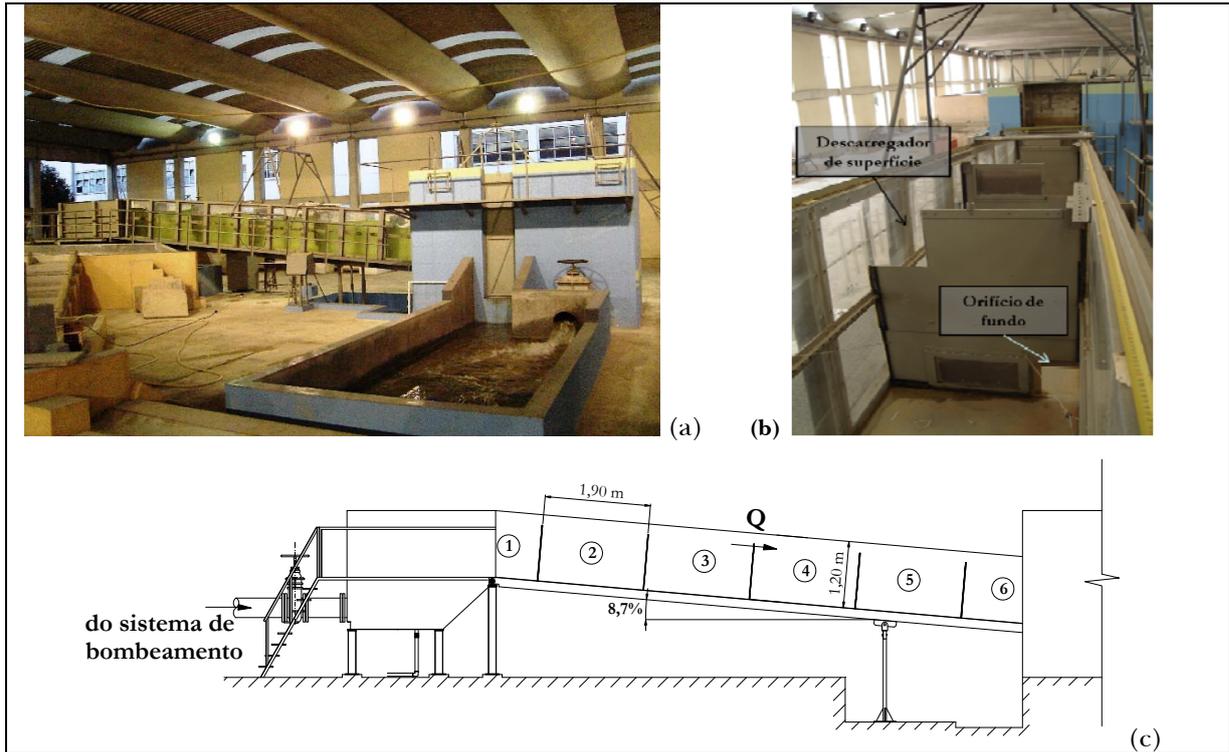


Figura 1 – Estrutura experimental: (a) vista geral; (b) detalhe do septo com a possibilidade de abertura regulável de descarregador de superfície e orifício de fundo; (c) esquema geral.

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 grandezas turbulentas. A série temporal de velocidades ($V_i(t)$) pode ser dividida em uma média temporal ($\bar{V}_x, \bar{V}_y, \bar{V}_z$) e uma componente turbulenta (v'_x, v'_y, v'_z). Assim, a série temporal de velocidades pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} V_x(t) &= \bar{V}_x + v'_x, \\ V_y(t) &= \bar{V}_y + v'_y, \\ V_z(t) &= \bar{V}_z + v'_z. \end{aligned} \quad (2)$$

A energia cinética turbulenta por unidade de massa (k) é dada por:

$$k = \frac{1}{2} (v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2), \quad (3)$$

sendo v'_x , v'_y e v'_z o desvio padrão das séries temporais.

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

$$\begin{aligned} &-\rho \overline{v'_x v'_y}, \\ &-\rho \overline{v'_x v'_z}, \\ &-\rho \overline{v'_y v'_z}. \end{aligned} \quad (4)$$

MATERIAIS E MÉTODOS

Instalação Experimental

A estrutura utilizada foi construída no pavilhão de ensaios do Núcleo de Recursos Hídricos e

Estruturas Hidráulicas (NRE), do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa/Portugal.

Essa estrutura pode ser considerada como um protótipo de uma passagem para peixes por bacias sucessivas, constituído por um canal de, aproximadamente, 10 m de comprimento e 1 m de largura, com declividade ajustável entre 0 e 17,5% (Figura 1). A montante desse canal encontra-se um tanque com, aproximadamente, 4 m³, e a jusante, um tanque maior, com área horizontal de 12 m² e aproximadamente 4 m de altura.

O canal pode compreender no máximo 10 bacias de comprimento de 1,00 m, divididas por septos delgados dotados de descarregadores de superfície (largura máxima 0,30 m) e/ou de orifícios de fundos (área máxima de 0,09 m²), cujas dimensões são reguláveis (Figura 1b). As paredes laterais do canal são de vidro transparente, possibilitando a visualização do escoamento.

Neste estudo foram instalados septos distanciados de, aproximadamente, 1,90 m, formando seis bacias (1 a 6 na foto da Fig. 1c), sendo os 4 centrais idênticos (2 a 5). Os ensaios foram conduzidos com o canal com declividade de 8,7%, considerando que as passagens para peixes do tipo bacias sucessivas normalmente apresentam declividades entre 5% e 12%. Os resultados apresentados neste trabalho correspondem aos ensaios com os orifícios de fundo com abertura de 0,20 m x 0,20 m. As aberturas encontram-se junto às paredes laterais, em posições alternadas em septos consecutivos (configuração “zigzague”). Os descarregadores de superfície foram mantidos fechados. A Figura 2a mostra esquematicamente essa geometria.

Medições de Velocidades

As medições de velocidade foram realizadas com um velocímetro Doppler da marca Nortek, o NDV (Nortek Doppler Velocimeter), usualmente denominado ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). Neste equipamento a medição do vetor velocidade ocorre nas suas três componentes cartesianas, em um pequeno volume localizado a, aproximadamente, 0,05 m da sonda emissora, com uma frequência máxima de aquisição de 25 Hz. No equipamento utilizado, além da escolha da faixa de velocidade, deve-se também optar pelo tamanho do volume de medição. A aquisição dos dados do NDV é realizada através do programa CollectV (CollectV, 2000).

Antes da realização dos ensaios foram conduzidos alguns testes a fim de definir a melhor con-

figuração dos parâmetros do equipamento. Foram analisadas diferentes faixas de velocidade, tamanho de volume de medição, frequência e tempo de amostragem, em dois pontos dentro da bacia: uma região no centro do tanque, de velocidades mais baixas e outro ponto em uma região de maiores velocidades. A faixa de velocidade nominal escolhida foi de $\pm 2,50$ m/s, que corresponde a uma componente horizontal máxima de $\pm 3,60$ m/s e uma componente vertical máxima de $\pm 0,90$ m/s. Optou-se pelo volume padrão de medição do vetor velocidade, que é um cubo com 9 mm de aresta, como recomendado pelo fabricante. Para a frequência de amostragem selecionou-se 25 Hz, que é o valor máximo permitido pelo equipamento. O ADV foi testado para tempos de amostragem variando entre 5 e 360 segundos. Verificou-se que para amostras a partir de 30 segundos obtiveram-se momentos estatísticos (média, desvio padrão, assimetria e curtose) praticamente constantes, com diferenças na ordem de grandeza do erro do equipamento. Considerando esta avaliação, adotou-se o tempo de aquisição igual a 90 segundos, totalizando 2250 dados por ponto.

Realizaram-se ensaios com três vazões, que possibilitam uma caracterização hidráulica satisfatória do escoamento neste tipo de estrutura. As medições de velocidade foram realizadas em uma malha tridimensional, em uma das bacias do canal (3ª bacia de jusante para montante), sendo que o escoamento pode ser considerado representativo das demais bacias, considerando que as profundidades médias nas bacias adjacentes eram iguais, caracterizando um escoamento uniforme. Em escadas para peixes considera-se o escoamento uniforme quando as características do escoamento (geralmente profundidades) são iguais em pontos homólogos de bacias consecutivas. Foram avaliadas as velocidades em cinco planos paralelos ao fundo do canal, um deles próximo ao fundo (0,01 m do fundo), e os outros afastados do fundo 10, 25, 50 e 80% da profundidade média do escoamento (Figura 2a). Em todos os planos, a distância refere-se do fundo do canal ao centro do cubo de medição de velocidades. Em cada um destes planos, realizaram-se, no mínimo, medições em 40 pontos, totalizando 200 pontos de medição na bacia, para cada vazão. Na Figura 2b apresenta-se uma malha aproximada dos pontos de medição de velocidade em cada plano. Em alguns planos foi possível realizar medições mais próximas das paredes das bacias.

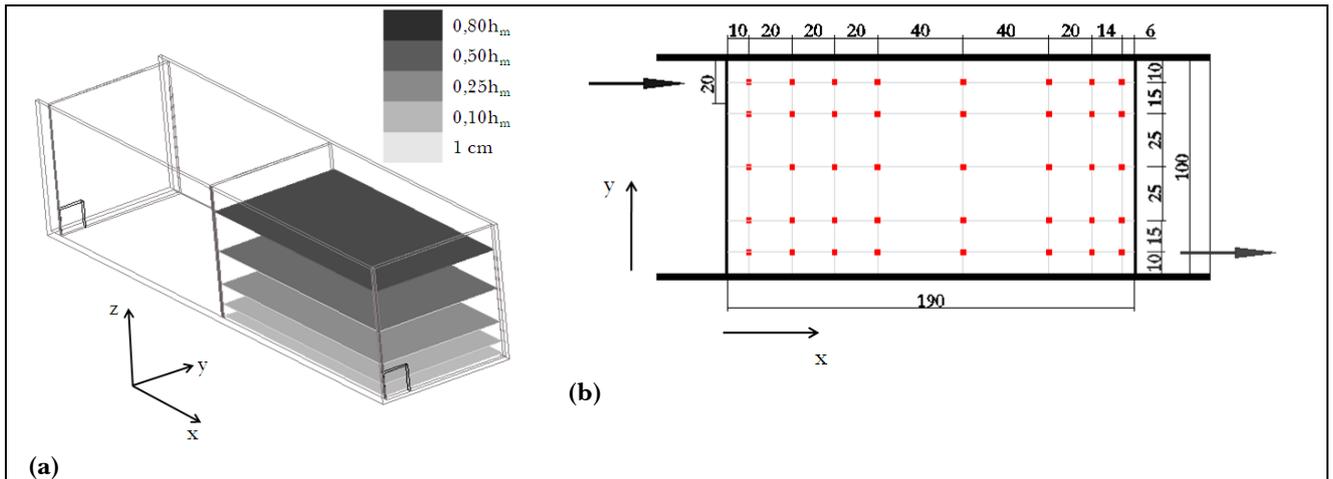


Figura 2 – Esquema dos pontos de medição de velocidades nos modelos das passagens para peixes por orifício de fundo: (a) representação dos planos de medição de velocidades paralelos ao fundo (h_m é a profundidade média na bacia); (b) malha aproximada de medição de velocidade em cada um dos planos (dimensões em cm).

O ADV foi colocado sobre ao canal, através de um carrinho móvel (Figura 3), que permite o posicionamento do equipamento em qualquer ponto sobre a bacia.



Figura 3 – Carrinho móvel sobre o canal onde é colocado o ADV.

Tratamento dos Dados de Velocidade

Sabe-se que o sistema ADV de medição de velocidades instantâneas apresenta um ruído que é inerente ao processo. Assim, no início das medições de velocidade, verificou-se a necessidade da avaliação dos dados e a possível existência de ruído inserido no sinal. Observava-se visualmente a diferença do tipo de sinal em diferentes condições do escoamento: (a) com menores velocidades; (b) com presença de bolhas de ar; (c) próximo a fronteiras e (d) com velocidades muito elevadas. Um parâmetro

indicativo da qualidade da informação registrada é a autocorrelação do sinal, cujos valores desejáveis variam entre 70% e 100% (CollectV, 2000). No entanto, escoamentos com turbulência e aeração elevadas não possibilitam alcançar estes níveis, o que significa que os dados registrados terão uma quantidade maior de ruído. Contudo, mesmo com valores baixos de correlação (a partir de 30%) pode-se avaliar valores de velocidades médias.

Dessas condições e das recomendações de fabricantes de velocímetros Doppler (Sontek, 2001), verificou-se a necessidade da 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 destes filtros nos dados retira da série de dados os *spikes* e, ao mesmo tempo, mantém um grande percentual dos dados na amostra, na maior parte das vezes superior a 80% do total. Verifica-se que com a aplicação do filtro PSTM, em média, os valores de energia cinética turbulenta são reduzidos em, aproximadamente, 20%, e os valores médios de tensões de Reynolds no plano xy em 15%, em relação aos resultados obtidos sem a utilização do filtro. Não se pode afirmar que a aplicação do filtro reduz todos os efeitos do ruído, mas se estima que os resultados obtidos se aproximem dos valores reais.

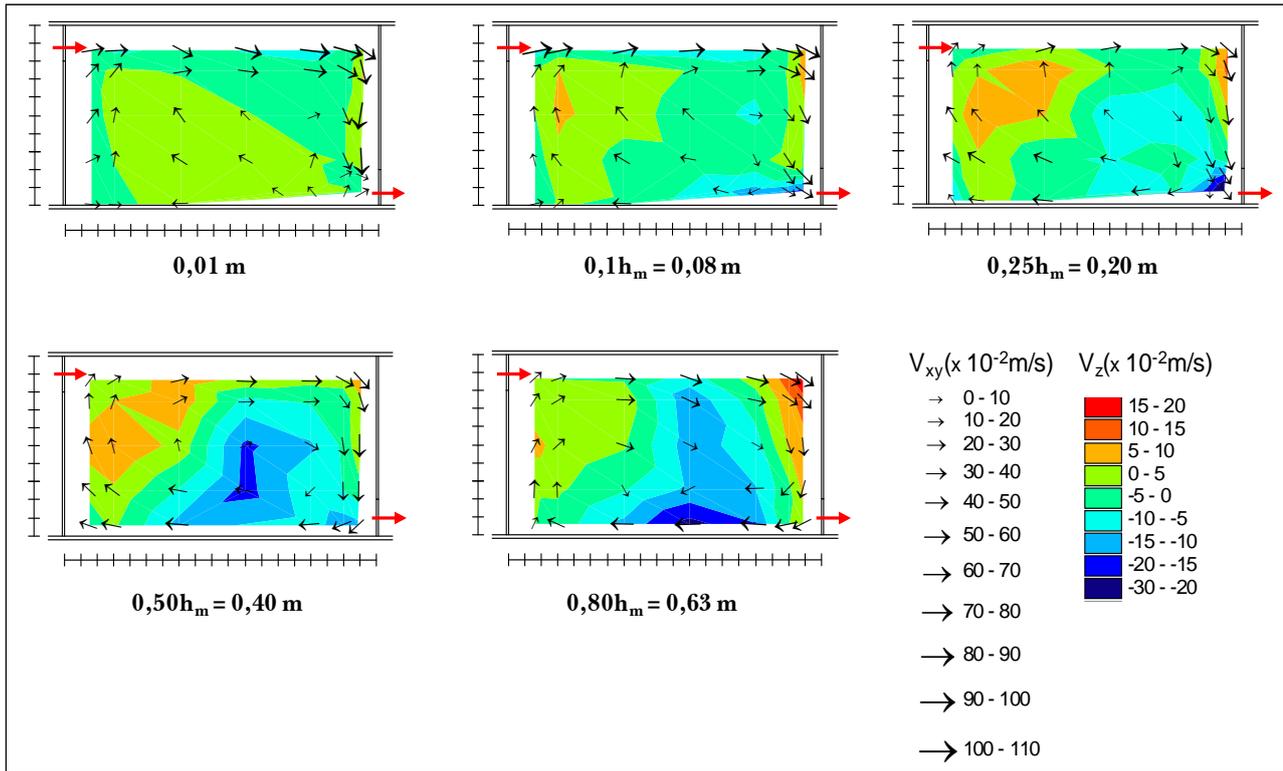


Figura 4 – Componentes horizontais de velocidades médias (vetores) em planos paralelos ao fundo do canal, e componentes verticais (escala de cores) para $Q = 0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$, e diferentes distâncias a partir do fundo: $h = 0,01 \text{ m}$; $0,10h_m$; $0,25h_m$; $0,50h_m$; $0,80h_m$ (h é a distância do plano ao fundo do canal).

Características das condições testadas

Foram realizadas medições das três componentes da velocidade em uma bacia de controle da estrutura, para três vazões, de acordo com as condições de ensaio apresentadas na Tabela 1, em que h_m é a profundidade média na bacia, medida na parte central de cada bacia, na lateral do canal; P_v é a potência dissipada por unidade de volume de fluido ($P_v = \gamma Q \Delta h / \text{volume da bacia}$); γ é o peso específico; Q é a vazão e Δh é o desnível entre bacias sucessivas.

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

Vazão (m^3/s)	h_m (m)	P_v (W/m^3)
0,0365	0,65	36,9
0,0403	0,79	41,6
0,0456	1,00	45,6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos itens seguintes apresentam-se os resultados de velocidades médias pontuais e grandezas turbulentas na forma de mapas, que foram obtidos a partir de interpolações lineares triangulares das medições pontuais, nos diferentes planos.

Campos de velocidades médias

A Figura 4 mostra os campos de velocidade em planos paralelos ao fundo para a descarga de $0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$. Nos planos situados a $0,01 \text{ m}$ e a $0,10h_m$ do fundo, observa-se uma grande recirculação alimentada pelo escoamento proveniente do orifício de fundo. As maiores velocidades ocorrem na linha do orifício de fundo de montante, seguem até encontrar com o septo de jusante, mudando de direção e mantendo valores altos de velocidade, em relação a outras regiões da bacia. Parte do escoamento encaminha-se para o orifício de jusante e parte alimenta a recirculação do escoamento dentro

da bacia. Ressalta-se que as medições a 0,01 m do fundo do canal foram realizadas fora dos limites recomendados pelo fabricante do velocímetro, sendo que possivelmente os pontos de medição a frente do orifício podem ter sido prejudicados pela configuração desfavorável de medição muito próximo de uma fronteira sólida e em uma região de turbulência elevada. Nos demais planos (0,25h_m, 0,50h_m e 0,80h_m), têm-se a recirculação do escoamento dentro da bacia, com velocidades menores às observadas nos outros dois planos que ficam sob influência direta do escoamento entre os orifícios.

Na Figura 4 são apresentadas as componentes verticais de velocidade em escalas de cores. Os valores positivos representam o fluxo ascensional, e os negativos, o fluxo descensional. Nos planos mais próximos ao fundo, situados a 0,01 m e 0,10h_m, as componentes verticais são pouco expressivas, com valores na maior parte entre -0,05 e 0,05 m/s. Na região de saída de água pelo orifício de jusante, nos planos situados a 0,10h_m e 0,25 h_m, observa-se fluxo descensional, com velocidades de até -0,30 m/s, representado as máximas componentes verticais de velocidade na bacia. Junto do defletor de montante observa-se que, ao contrário, há um fluxo ascensional com velocidades de até 0,10 m/s, também menos expressivo que o fluxo no plano xy.

O mesmo comportamento foi observado para as outras duas descargas testadas e os resultados completos podem ser consultados em Sanagiotto (2007).

A Figura 5 mostra uma representação 3D do padrão geral de escoamento na bacia, construído a partir do comportamento médio das velocidades para as três descargas avaliadas. Nesta figura a parte mais grossa do traço é a origem do vetor velocidade e a espessura é um indicativo do módulo da velocidade no ponto.

A Figura 6 apresenta as máximas velocidades medidas em cada plano para as três descargas testadas. Nessa análise salienta-se a ocorrência das máximas magnitudes de velocidade nos planos sob influência direta do escoamento através dos orifícios.

No entanto, as velocidades medidas dentro da bacia não são as máximas velocidades presentes na passagem por bacias sucessivas com orifícios de fundo. Existem velocidades maiores em regiões mais próximas ao orifício e na seção deste (que não puderam ser medidas com o equipamento disponível). No entanto, esses valores podem ser estimados teoricamente conforme apresentado na Tabela 2.

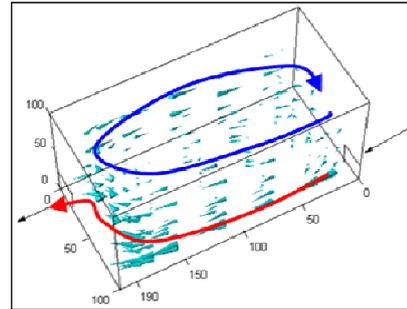


Figura 5 – Esquema tridimensional do escoamento na escada para peixes com orifício de fundo.

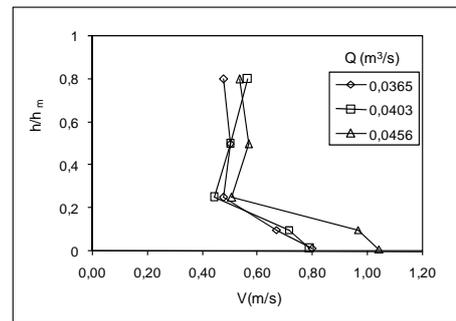


Figura 6 – Máximas velocidades médias em cada plano, para as três descargas testadas.

A velocidade média do escoamento na seção do orifício, $V_{med\ orifício}$, pode ser avaliada considerando a descarga e a área da seção de escoamento ($A_o = 0,04m^2$). A máxima velocidade esperada, $V_{max\ orifício}$, pode ser obtida, de forma simplificada, através da velocidade potencial ($V_p = \sqrt{2g\Delta h}$), que representa a velocidade obtida se a energia potencial for transformada em energia cinética. A Tabela 2 apresenta os valores teóricos da velocidade média e da velocidade máxima na seção do orifício, para as descargas avaliadas, sendo $V_{max\ bacia}$ a máxima velocidade média medida na bacia.

Na Tabela 2 observa-se que a velocidade máxima potencial na seção do orifício é, em geral, 70% superior ao valor médio da velocidade calculado com os dados de vazão e seção de escoamento. Já os máximos valores medidos nas bacias representam cerca de 50% da velocidade máxima no orifício. Essa última comparação evidencia que vencido o ‘obstáculo’ da passagem pelo orifício, dentro da bacia os peixes encontram condições de escoamento que exigem menor esforço.

Tabela 2 – Valores característicos das velocidades na escada para peixes com orifícios de fundo.

Q (m ³ /s)	Δh (m)*	Valores calculados		Valores medidos	$\frac{V_{\max \text{ orifício}}}{V_{\text{med orifício}}}$	$\frac{V_{\max \text{ bacia}}}{V_{\max \text{ orifício}}}$
		V _{med orifício} (m/s)	V _{max orifício} (m/s)	V _{max bacia} (m/s)		
0,0365	0,125	0,91	1,57	0,80	1,72	0,51
0,0403	0,155	1,01	1,75	0,79	1,73	0,45
0,0456	0,190	1,14	1,93	1,04	1,69	0,54

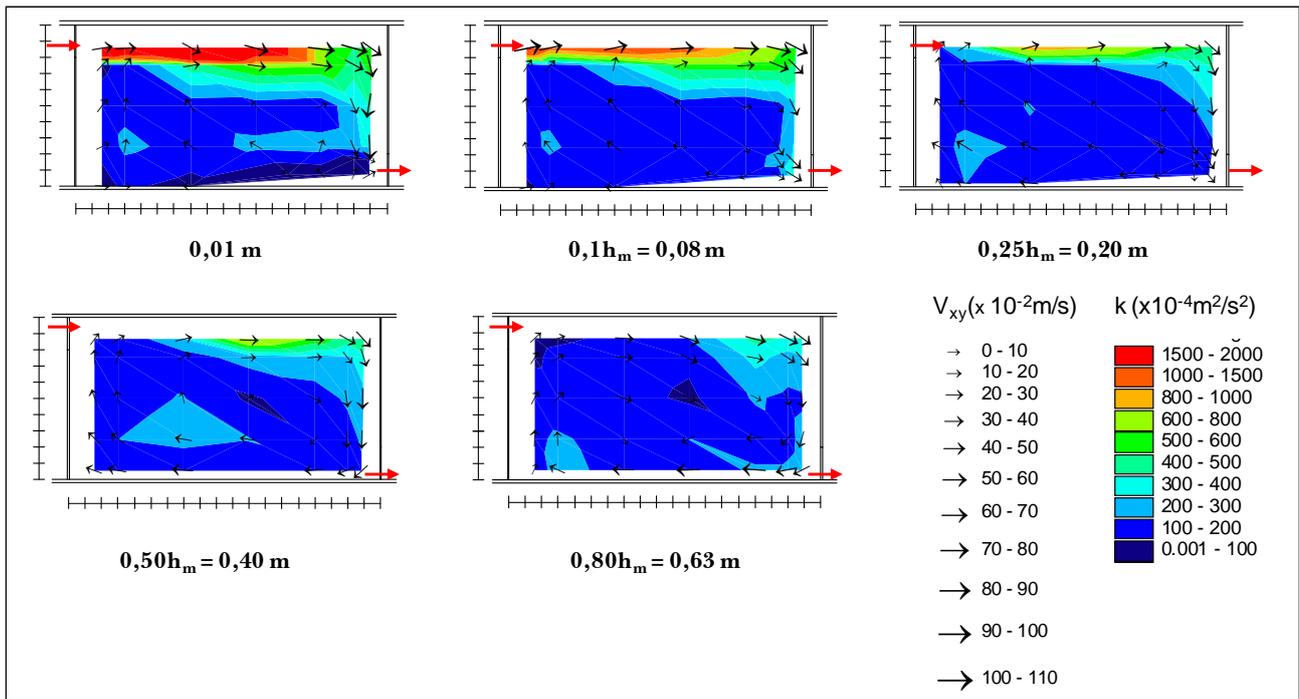


Figura 7 – Campos de energia cinética turbulenta em planos paralelos ao fundo para $Q = 0,0403 \text{ m}^3/\text{s}$ e diferentes distâncias a partir do fundo: $h = 0,01 \text{ m}$; $0,1h_m$; $0,25h_m$; $0,50h_m$ e $0,80h_m$ (h é a distância do plano ao fundo do canal).

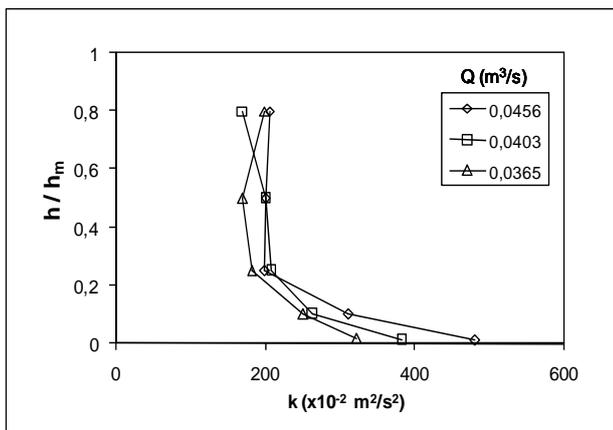


Figura 8 – Valores médios de energia cinética para cada plano paralelo ao fundo.

Campos de energia cinética turbulenta

A turbulência pode ser caracterizada através de diferentes grandezas, um dos quais é a energia cinética turbulenta (Eq. 3). A distribuição desta grandeza está representada na Figura 7. Os maiores valores de energia cinética turbulenta encontram-se no caminho do escoamento principal, definido entre os orifícios consecutivos nos planos situados dentro da altura do orifício. Para as demais profundidades, os valores seguem a distribuição observada no plano próximo ao fundo. No entanto, os valores na região correspondente ao “fluxo principal” são menores, não ultrapassando $0,08 \text{ m}^2/\text{s}^2$, enquanto junto ao fundo, alcançam até $0,20 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

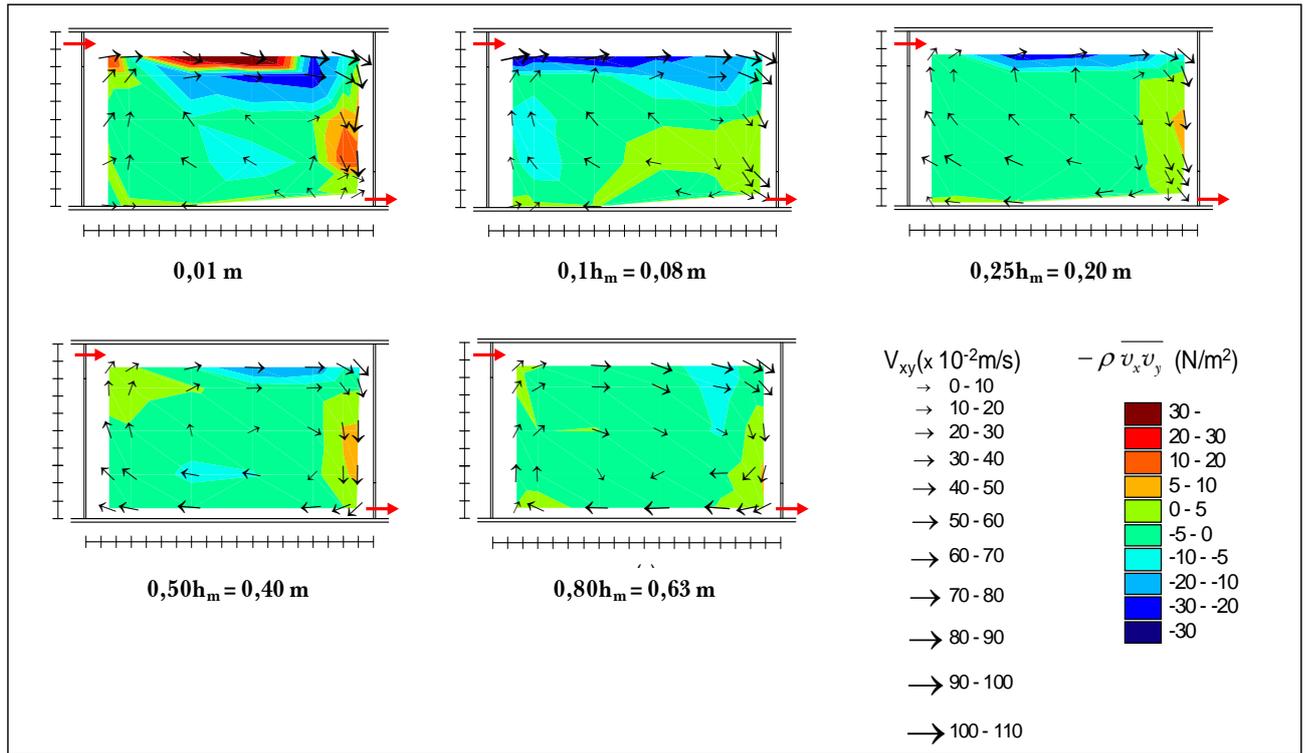


Figura 9 – Campos de tensões de Reynolds no plano xy (N/m²) em planos paralelos ao fundo para Q = 0,0403 m³/s e diferentes distâncias a partir do fundo: h = 0,01 m; 0,10h_m; 0,25h_m; 0,50h_m; 0,80h_m (h é a distância do plano ao fundo do canal).

A distribuição dos valores de energia cinética turbulenta indica que, possivelmente, os peixes encontrarão maiores dificuldades de permanência na região do “fluxo principal”, onde os valores são bastante elevados. No entanto, a maior parte da bacia apresenta valores baixos desse parâmetro, que representam zonas de descanso para os indivíduos.

A Figura 8 mostra os valores médios de energia cinética turbulenta em cada plano, com o objetivo de comparar o comportamento desta grandeza para os diferentes planos e descargas. Observa-se que para os planos situados a 0,25h_m, 0,50h_m e 0,80h_m, o valor médio é um pouco inferior a 0,02 m²/s², sendo praticamente constante, independente da vazão e da profundidade. Para o plano próximo ao fundo (0,01 m), têm-se os maiores valores e observa-se que estes são maiores para as maiores descargas. Para o plano situado a 0,10h_m, têm-se valores um pouco inferiores aos do fundo, e também se pode perceber a relação da energia cinética turbulenta com a vazão.

Campos de tensões de Reynolds no plano xy

Os campos das tensões de Reynolds podem ser avaliados para os três planos (xy, xz, yz). Aqui se apresentam as tensões de Reynolds no plano xy (componentes horizontais), onde se observam os maiores valores. A avaliação dos campos de tensões de Reynolds no plano xy (Figura 9) indica que para os planos correspondentes às profundidades 0,25h_m, 0,50h_m e 0,80h_m, tem-se um mesmo comportamento, com valores na maioria das áreas entre -5 e 5 N/m². Esses resultados refletem as regiões da bacia onde as velocidades são baixas, com flutuações também moderadas. Para os planos que recebem diretamente o fluxo proveniente do orifício (distantes 0,01 m e 0,10h_m do fundo) pode-se verificar que na região da entrada da água na bacia, em frente ao orifício, ocorrem os maiores valores em módulo de tensões de Reynolds, variando entre -30 e 30 N/m², com mudança do sinal indicando uma região de separação do escoamento.

A Figura 10 apresenta os valores médios em cada plano para as tensões de Reynolds no plano xy para as três descargas testadas. Observa-se que para o plano distante 0,01 m do fundo, os valores entre as três descargas estão bastante dispersos. Para as demais profundidades, os valores médios para as diferentes vazões seguem uma tendência, indicando que se podem utilizar os campos de tensões de Reynolds para estimar a distribuição desses valores para outras profundidades que não as medidas.

Como comentado anteriormente, alguns autores consideram as tensões de Reynolds como um valioso indicativo para relacionar a turbulência com o comportamento biológico. Sob esse aspecto, verifica-se que as espécies apresentarão maiores dificuldades junto ao orifício e na parede junto ao fluxo principal proveniente deste. Faz-se necessário avaliar a capacidade natatória das espécies e a tolerância à turbulência do escoamento, para que se possam associar essas informações com os valores obtidos aqui, característicos desse modelo de escada para peixes.

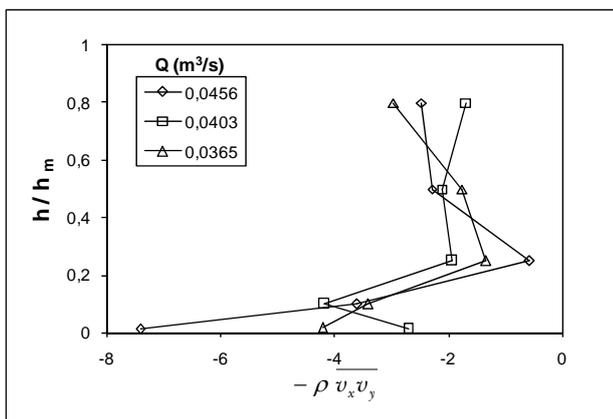


Figura 10 – Valores médios das tensões de Reynolds (N/m²) no plano xy para cada plano paralelo ao fundo no modelo de descarregador de superfície.

Outras grandezas indicativas da turbulência do escoamento foram testadas mas não trouxeram informações adicionais além das observadas com a energia cinética turbulenta e com as tensões de Reynolds. A energia cinética turbulenta e as tensões de Reynolds apresentaram resultados que parecem explicar de forma adequada os padrões de turbulência do escoamento nessa estrutura. Além disso, essas são as grandezas atualmente utilizadas por outros pesquisadores interessados em relacionar

o comportamento do peixe com a turbulência do escoamento, entre eles Odeh *et al.* (2002), Lupandin (2005) e Silva *et al.* (2010).

CONCLUSÕES

Apresentaram-se neste trabalho resultados de um estudo experimental realizado em um modelo físico de uma escada para peixes de bacias sucessivas com orifícios de fundo. Velocidades médias e grandezas indicativas da turbulência foram avaliadas a partir de medições de velocidade em uma bacia do modelo, utilizando um velocímetro acústico Doppler (ADV).

A avaliação das velocidades médias do escoamento na escada para peixes, do tipo orifício de fundo, indica não ocorrerem grandes variações do comportamento geral para as descargas avaliadas, sendo possível definir um padrão geral do escoamento. O escoamento nas bacias desse tipo de passagem para peixes pode ser caracterizado por um fluxo “principal”, com velocidades maiores, conectando orifícios consecutivos e uma grande recirculação de eixo vertical, que se forma ocupando toda a bacia. À medida que o escoamento se afasta da zona sob influência direta do escoamento entre os orifícios, observou-se que a recirculação se mantém, porém com componentes de velocidade inferiores, sendo que os valores não ultrapassam 30% da velocidade potencial, enquanto nos planos mais próximos ao fundo atingem até 50%. Observaram-se componentes verticais de velocidade com valores entre -0,30 m/s e 0,20 m/s, não se identificando um padrão geral para o escoamento.

A energia cinética turbulenta e as tensões de Reynolds apresentam maiores magnitudes no caminho do escoamento principal entre orifícios consecutivos. Os valores de energia cinética turbulenta chegaram a alcançar até 0,20 m²/s² junto ao fundo, verificando-se maiores valores para as maiores descargas, enquanto na região central da bacia, o valor médio é um pouco inferior a 0,02 m²/s², sendo praticamente constante, independente da vazão e da profundidade.

Na região da entrada da água na bacia, em frente ao orifício, ocorrem os maiores valores em módulo de tensões de Reynolds. No entanto, não se verificou um padrão independente da descarga. Possivelmente esse fato resulta das limitações de medições com o ADV em posições próximas a fronteiras sólidas. Para as profundidades fora da linha de

ação do orifício, tem-se um mesmo comportamento, independente da vazão, com valores baixos de tensões de Reynolds, com a maioria das regiões com valores entre -5 e 5 N/m². Considerando que em toda a bacia, têm-se valores entre -30 e 30 N/m².

As características da escada com orifício de fundo obviamente favorecem as espécies com hábitos de nado junto ao fundo. Embora estudos com a ictiofauna não tenham sido realizados, pode-se dizer que se determinada espécie conseguir passar pelos orifícios, esses indivíduos não terão dificuldades dentro das bacias em relação a valores muito elevados de velocidade e quanto à turbulência do escoamento. No entanto, é necessário avaliar se o escoamento produz condições adequadas quanto ao fluxo de atração aos peixes, já que se observaram zonas dentro das bacias, em que, quer os valores médios das componentes da velocidade, quer as flutuações turbulentas das velocidades, por um lado, favorecem o descanso dos peixes durante a progressão, podem por outro lado, constituir um fator de desincentivo para que prossigam para montante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições que auxiliaram a realização desta pesquisa, através de projetos de pesquisa e bolsas de doutorado, doutorado sanduíche e iniciação científica: CAPES, CNPq, FAPERGS, IPH/UFRGS, IST/UTL e LNEC.

REFERÊNCIAS

- CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. Barragens e Peixes – Análise crítica e recomendações. Boletim 116, 115p, 1999.
- CLAY, C. H. Design of fishways and other fish facilities. (2nd ed). Boca Raton, Lewis, 248p, 1995.
- COLETTI, J. Z. 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, 2005.
- COLLECTV. CollectV, Software Manual, Version 3.2, Nortek USA, 32p, 2000.
- GORING, D. G., NIKORA, V. I. Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. Journal of Hydraulic Engineering, v. 128, n. 1, p. 117-126, 2002.
- KIM, J. H. Hydraulic characteristics by weir type in a pool-weir fishway. Ecological Engineering, V. 16, Issue 3, 425-433, January 2001.
- LUPANDIN, A. I. Effect of Flow Turbulence on Swimming Speed of Fish. Biology Bulletin, v. 32, 461-466, 2005.
- MARTINS, S. L. Sistemas para a Transposição dos Peixes. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP, 2000.
- MARTINS, S. L. Sistemas para a Transposição de Peixes Neotropicais Potamódromos. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP, 2005.
- ODEH, M., NOREIKA, J. F., HARO, A., MAYNARD, A., CASTRO-SANTOS, T., CADA, G. F. 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., SKOROBGATOV, M. A. Effect of the Flow Turbulence on the Movement Pattern of the Caudal Fin in Fish. Doklady Biological Sciences, Vol. 428, pp. 464-466, 2009.
- PENA, L. 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 Enxeñería Civil, Universidade da Coruña, 2004.
- PUERTAS, J., PENA, L., TEIJEIRO, T. Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, January, p. 1-14, 2004.
- RAJARATNAM, N., VINNE, V. D., KATOPODIS, C. Hydraulics of vertical slot fishways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 112, n. 10, October, 1986.
- RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C e MAINALI, A. Plunging and Stream Flow in Pool and Weir Fishways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114, 939-944, 1988.
- RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C., SOLANKI, S. New design for vertical slot fishways. Canadian Journal of Civil Engineering. Volume 19, Número 3, 402-414, 1992.
- SANAGIOTTO, D. G. Análise da macroturbulência do escoamento em escadas para peixes por bacias sucessivas. Tese de doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, 2007.
- SILVA, A.T., SANTOS, J.M., FERREIRA, M.T., PINHEIRO, A.N., KATOPODIS, C. Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in na ex-

- perimental pool-type fishway. *River Research and Applications*. DOI: 10.1002/rra.21363. 2010.
- SONTEK. Sontek ADVField Acoustic Doppler Velocimeter. Technical Documentation. San Diego, USA, 2001.
- TARRADE, L., TEXIER, A., DAVID, L., LARINIER, M. Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia*. 609, 177-188, 2008.
- TRITICO, H. M., 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. 2009.
- VIANA, E. M. F. 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, 2005.
- WAHL, T. L. Discussion of "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data" by Goring, D. G. e Nikora, V. I. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 9, p. 987-988, 2003.
- WU, S., RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C. Structure of flow in vertical slot fishway. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, n. 4, April, 1999.

Key-words: *Fish passes, Fishways, turbulence, Reynolds' shear stress, turbulent kinetic energy*

Characterization of Mean Velocities and Turbulent Flow Patterns in Fishways Equipped With Bottom Notches

ABSTRACT

Dam construction and its barrier effects represent the most significant disturbances caused by man-made activities in rivers, interfering with fish movements and causing serious constraints to the reproduction of migratory species. In an attempt to help species progress upstream, many dams include fish passes to help the species in their life cycles maintaining their free movement. This paper evaluates flow in a pool-type fishway equipped with bottom notches. The study was conducted in a physical model. Velocity measurements were performed in a pool of a model with an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). Based on velocity data dimensional mean flow and turbulence structure were defined by turbulent kinetic energy and Reynolds' shear stress.