

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MEDIÇÃO DE VAZÃO, VELOCIDADE E TURBULÊNCIA COM ADV E ADCP EM UMA ESCADA PARA PEIXES

Hersília de Andrade e Santos¹; Guilherme Antônio Ribeiro de Souza²; Leandro Fernandes Celestino³; Itamar Herculano Gonçalves¹; Ludmila Moura Moreira Mendes⁴; Ricardo Ahouagi Carneiro Junho⁵

Abstract: Fishways were built in Brazil mainly between 2000 and 2020 with the aim of allowing Neotropical fish species to migrate upstream. These structures need constant monitoring to assess whether the objectives envisaged at the time of implementation are being achieved or whether the structures need new adaptations. In the world, the spillway and orifice fish ladder is one of the most traditional models and at the Porto Primavera hydroelectric power station (Brazil), a system of this type has been in operation since 2001. This fish ladder is 472.5 meters long, has 50 tanks and a slope of 5%. Each tank is 2 meters deep, 8 meters long and 5 meters wide. Demands to understand the flow encountered by schools of fish in critical areas of this system, such as resting ponds, prompted the measurement of flow, velocity and turbulence in various sections of the fishway. The ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) and ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) were used to do this. The results showed that the flow rate in the least turbulent tank was 3 m³/s. The average point velocities were less than 2 m/s even though the instantaneous and point values were higher than this value. Attention should be paid to the turbulence in tanks 36 and 41, since the kinetic energy was in the order of 1 m²/s². It is therefore possible to use this equipment in an adapted way to measure flow, velocity and turbulence in hydraulic channels of significant size.

Resumo: Mecanismos de transposição de peixes (MTP) foram construídos no Brasil principalmente entre 2000 e 2020 com o objetivo de permitir a migração para montante de espécies de peixes neotropicais. Essas estruturas precisam de monitoramento constante para avaliar se os objetivos previstos na época de implantação estão sendo atingidos ou se as estruturas precisam de novas adaptações. No mundo, a escada do tipo vertedor e orifício é um dos modelos mais tradicionais e na usina hidrelétrica de Porto Primavera (Brasil), um sistema desse tipo funciona desde 2001. Essa escada para peixes possui 472.5 metros de comprimentos, 50 tanques e declividade de 5%. Cada tanque possui a profundidade de 2 metros, comprimento de 8 metros e largura de 5 metros. Demandas sobre a compreensão do escoamento encontrado por cardumes de peixes em áreas críticas desse sistema, como em tanques descanso, motivaram a medição da vazão, velocidade e turbulência em diversos trechos do MTP. Para isso foram utilizados o ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) e o ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Os resultados encontrados permitiram determinar que a vazão no tanque menos turbulento foi de 3 m³/s. As velocidades médias pontuais

1) CEFET-MG, Avenida Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, CEP: 30510-000, (31) 3319-6848, hsantos@cefetmg.br

2) CEFET-MG, Avenida Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, CEP: 30510-000, (31) 3319-6848, guilhermearns@yahoo.com.br

3) Auren Energia, leandro.celestino@auenenergia.com.br

4) CEFET-MG, Avenida Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, CEP: 30510-000, (31) 3319-6848, lud-mm@hotmail.com

5) Consultoria de Recursos Hídricos Ltda, ricardo.junho@hidicon.com.br

foram menores que 2 m/s apesar de valores instantâneos e pontuais serem superiores a esse valor. Atenção deve ser dada à turbulência dos tanques 36 e 41, uma vez que a energia cinética foi da ordem de 1 m²/s². Dessa forma, é possível utilizar esses equipamentos de forma adaptada na medição de vazão, velocidade e turbulência em canais hidráulicos de porte significativo.

Palavras-Chave – *Mecanismos de transposição de peixes, monitoramento, calibração*

INTRODUÇÃO

Mecanismos de transposição de peixes (MTP) foram construídos no Brasil principalmente entre 2000 e 2020 com o objetivo de permitir a migração para montante de espécies de peixes neotropicais. Essas estruturas precisam de monitoramento constante para avaliar se os objetivos previstos na época de implantação estão sendo atingidos ou se as estruturas precisam de novas adaptações (Silva et al. 2018).

O escoamento hidráulico dentro das chamadas escadas para peixes é função do processo de dissipação energia criado por anteparos que podem ser dos mais diversos tipos. Essas obstruções também permitem um aumento da inclinação dos canais, diminuindo consequentemente suas extensões. No entanto, a partir de um determinado desnível, as escadas passam a não ser economicamente viáveis, à medida que, para manterem uma velocidade admissível e, portanto, uma inclinação admissível, seus comprimentos devem ser demasiadamente longos. Assim, esse tipo de MTP é frequentemente empregado em barragens com alturas inferiores a 25m, sendo que a inclinação da mesma deve estar entre 10 e 15%, para escadas com tanques, e até 20% para escadas do tipo Denil (Larinier,2002).

A dinâmica do escoamento hidráulico é o principal fator que influencia a navegação dos peixes dentro das estruturas de usinas hidrelétricas ou em áreas adjacentes. As principais variáveis hidráulicas relacionadas ao comportamento dos peixes são: velocidade do escoamento (Silva et al., 2020; Santos et al., 2018; Goodwin et al., 2014; Tiffan et al., 2009; Castro-Santos, 2006), pressão (Goodwin et al. 2014), deformação hidráulica total (Goodwin et al. 2014), gradiente de velocidade espacial (Enders et al. 2012) e turbulência (Silva et al. 2020; Tiffan et al. 2009).

No mundo, a escada do tipo vertedor e orifício é um dos modelos mais tradicionais e na usina hidrelétrica de Porto Primavera (Brasil), um sistema desse tipo funciona desde 2001. Essa escada para peixes possui 472.5 metros de comprimentos, 50 tanques e declividade de 5%. Cada tanque possui a profundidade de 2 metros, comprimento de 8 metros e largura de 5 metros. Os tanques são separados por *slots*, na configuração atual cada *slot* pode possuir de 3 a 4 vertedores/orifícios abertos para passagem da água. Demandas sobre a compreensão do escoamento encontrado por cardumes de peixes em áreas críticas desse sistema, como em tanques descanso, motivaram a medição da vazão, velocidade e turbulência em diversos trechos do MTP. Para isso foram utilizados o ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) e o ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Apesar de amplamente utilizados para esse propósito, o desafio desse trabalho foi adequar o sistema de medição ao porte da estrutura hidráulica. No caso do ADV, a escada para peixes é uma estrutura grande uma vez que o equipamento foi pensando para uso em laboratório. No caso do ADCP, o equipamento que utilizado é normalmente para medições em grandes rios e lagos.

O ADV (Figura 1) é um equipamento utilizado para medição de velocidade indireta das partículas presentes na água nos três eixos, x, y e z. A medição de velocidade é feita através do efeito Doppler, medindo a mudança na frequência do som refletido das partículas na água e utilizando um transmissor (DURGESH et al., 2014). O transmissor gera um pulso curto de som de

frequência conhecida, quando o pulso passa pelo volume de medição, a energia acústica é refletida em todas as direções das partículas da água. Os receptores acústicos captam a energia refletida, medindo a velocidade pela diferença da frequência do eco (ANDERSON; LOHRMANN, 1995; CABRAL, 2014). O ADV tem sido amplamente utilizado em estudos experimentais em condutos e em campo (SHARMA; MADDIRALA; KUMAR, 2018). A principal vantagem de usar o ADV é que ele pode medir a velocidade instantânea tridimensional, características turbulentas e densidade espectral de potência.

Já o ADCP (Figura 2) é um equipamento utilizado para medição de vazão e o seu princípio de funcionamento baseia-se no fenômeno físico Efeito Doppler, isto é, por meio da transmissão de ondas sonoras pela água pode-se conhecer a velocidade das partículas transportadas pela corrente. Estas refletem o som de volta para o instrumento, que percebe o eco através de sensores, fazendo com que ele reconheça as diferentes profundidades e as velocidades das respectivas linhas de corrente (CARVALHO, 2008). A partir desses dados, é realizado o cálculo da vazão pela integração dos produtos da área e velocidade parciais.

METODOLOGIA

Os serviços de campo foram realizados no período de 18 a 22 de abril de 2022, no interior da escada para peixes, nos tanques Tq5, Tq11, Tq22, Tq36 e Tq 41. Os NA's médios diários do reservatório encontravam-se na El. 257,32 m, nos dias 18 e 19, na El. 257,31 m, no dia 20, na El. 257,29 m, no dia 21, e na El. 257,28 m, no dia 22. Foram realizadas medições de velocidades com equipamento tipo ADV (Micro-ADV 16MHz da marca Sontek-Figura 1) e de vazão com equipamento tipo ADCP (Rio Grande Workhorse da Teledyne RDI 1200MHz - Figura 2).

Figura 1 - Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) em medição na Escada para Peixes da UHE Porto Primavera



Figura 2 - Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) em medição na Escada para Peixes da UHE Porto Primavera



Para a realização das medições, considerando a necessidade do correto funcionamento do ADCP e do ADV, de vencer larguras dos tanques variáveis de 5 metros a 9 metros, suportar o peso dos aparelhos, posicionar os equipamentos medidores em diferentes profundidades, e de coleta de dados dos equipamentos a partir das laterais da escada, por condicionantes de segurança do pessoal envolvido no processo de medição, foi projetado um sistema com trilhos e carro, construídos em aço, que se encontra na Figura 3.

As medições com ADCP e ADV foram realizadas nos tanques Tq 11, Tq 17, Tq 22, Tq 36 e Tq 41, tendo sido realizada medição apenas com ADV no Tq 5. Foram coletados 154 pontos de informações ao longo de 25 planos com ADV e levantados 12 planos de ADPC, com um total de 84 transectos (19+27+21+17), conforme apresentado na Figura 4 e na Tabela 1.

Para cálculo das velocidades nos tanques, provenientes das medições com ADV, o programa HorizonADV (v. 1.20, SonTek, San Diego, CA, EUA) foi usado para adquirir os dados no computador. Os parâmetros de configuração foram os seguintes: 1) frequência de 50 Hz; 2) faixa de velocidade até 250 cm/s; 3) tempo de amostragem de 42 segundos; 4) temperatura da água de 25 °C. Os dados adquiridos foram filtrados pelo método de limiar de espaço de fase (PSTM), que foi desenvolvido por Goring e Nikora (2002) e modificado / implementado por Wahl (2003) em WinADV (v. 2.031, Bureau of Reclamation, Denver, CO, EUA). A aplicação desses filtros removeu *outliers*, preservando uma grande porcentagem dos dados (mais de 80% do total de dados neste estudo). A partir dos dados de velocidade média e energia cinética turbulenta média para cada ponto medido com ADV foram calculadas as médias pontuais, que representam um parâmetro estatístico da velocidade medida em três direções (x, y e z), como indicada na série temporal do ponto 1 do tanque 5, apresentada na Figura 5. As variações nas velocidades instantâneas em relação à média fornecem a turbulência e podem ser mais bem percebidas por meio dos histogramas da Figura 5.

As vazões foram estimadas com o programa Winriver II da Teledyne RDI por meio dos dados do ADCP. Foram produzidos perfis de velocidade também com esse *software* para os planos onde foram coletados os dados.

Figura 3 – (a) Esquema do carro para suporte do ADV e do ADCP (b) Montagem do trilho em tanque da escada para peixes da UHE Porto Primavera

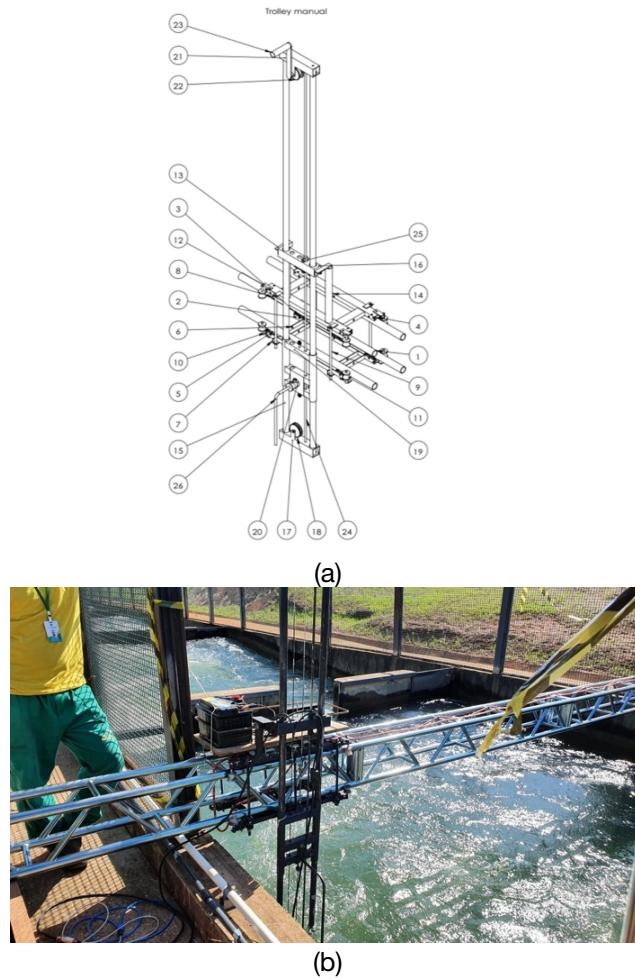


Figura 4 – Esquema do tanque 05 com a localização dos planos de medição (a) e esquema do tanque 11 com a localização dos planos de medição (b)

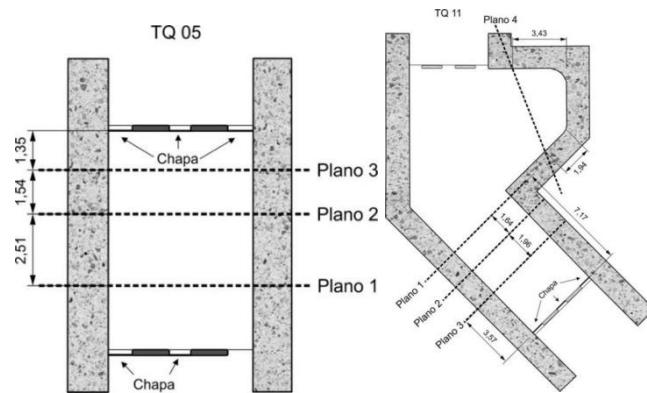


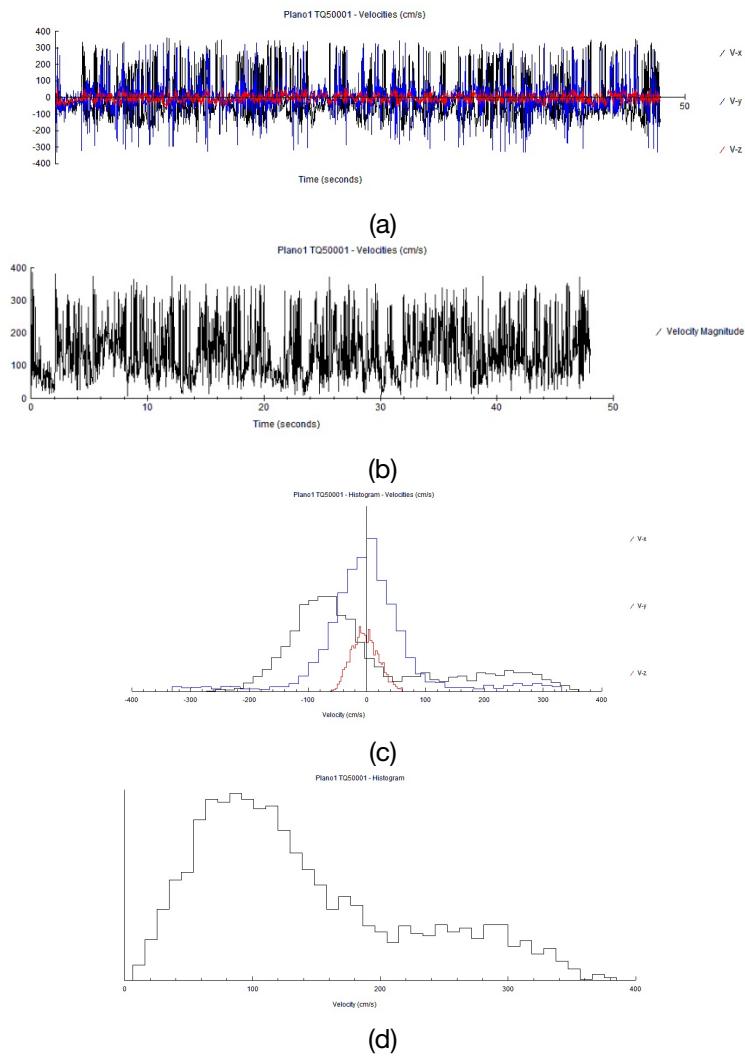
Tabela 1 – Planos e tipos de equipamentos utilizados nas medições nos 5 tanques

Tanque	Plano	Distância até slot a jusante (m)	Medições com ADV	Medições com ADCP
22	1	3.31	Sim	Sim
	2	1.26	Sim	Sim
	3	5.25	Sim	Sim
	4	7.99	Sim	Não
	5	11.13	Sim	Não
	6	*	Sim	Não
	7	*	Sim	Não
17	1	5.25	Sim	Sim
	2	3.65	Sim	Sim
	3	1.47	Sim	Sim
11	1	7.17	Sim	Sim
	2	5.53	Sim	Sim
	3	3.57	Sim	Sim
	4	*	Sim	Não
5	1	5.40	Sim	Não
	2	2.89	Sim	Não
	3	1.35	Sim	Não
36	1	3.52	Sim	Sim
	2	5.75	Sim	Sim
	3	7.64	Sim	Sim
	4	9.74	Sim	Não
	5	13.85	Sim	Não
41	1	1.60	Sim	Não
	2	3.51	Sim	Não
	3	5.00	Sim	Não

RESULTADOS

Conforme apresentado na Tabela 2, os valores máximos de magnitude da velocidade média pontual variaram de 1,06 m/s, no Tanque 5, a 1,81 m/s, no Tanque 36. As máximas energias cinéticas turbulentas pontuais ocorreram no tanque 36, de 1,06 m²/s², e no Tanque 41, de 1,18 m²/s².

Figura 5. Tanque 6 – Ponto 1. (a) Série temporal de velocidade coletada para velocidades em x, y e z (em cm/s) (b) Série temporal da magnitude da velocidade calculada; (c) Histograma das velocidades coletadas para velocidades em x, y e z (em m/s) e (d) Histograma da magnitude da velocidade calculada



As medições com ADCP forneceram o campo de velocidades instantâneo ao longo dos planos. Nos tanques com escoamento mais direcional, ou seja, com menor formação de grandes vórtices, como no tanque 11 foi possível coletar informações do perfil ao longo dos 5 metros de largura do canal. Tanques mais turbulentos e com mais vórtices tiveram parte da seção transversal não adquirida pelo ADCP. Grande parte do campo de velocidades apresentou velocidades abaixo de 2 m/s, mas, em alguns locais, as velocidades pontuais e instantâneas superaram 3 m/s.

Em termos de vazão pela escada para peixes, foi realizada a análise de todos os transectos coletados ao longo dos 4 tanques. Entretanto, o ADCP possui dificuldades de cálculo preciso de vazões em seções transversais muito turbulentas e com fluxos direcionais variados. Entre os tanques com melhor direcionamento de fluxo destaca-se o tanque 11 cuja vazão média fornecida com as medições do ADCP nos planos desse tanque, é de 3,03 m³/s (Tabela 3). Por isso, está vazão foi considerada como representativa do escoamento na escada para peixes nos dias das medições.

Tabela 2 – Valores máximos de velocidades pontuais médias (m/s) e de energia cinética turbulenta (m^2/s^2) por tanque

Tanque	Máxima Velocidade Pontual Média (m/s)			Máxima Magnitude média velocidade (m/s)	Máxima Flutuação da Velocidade Pontual (m/s)			Energia Cinética Máxima (m ² /s ²)
	Vx	Vy	Vz		Vx'	Vy'	Vz'	
5	0,31	0,37	0,13	1,06	0,78	0,54	0,23	0,45
11	0,56	1,42	0,11	1,76	0,31	0,32	0,20	0,11
17	0,88	0,74	0,14	1,71	0,54	0,47	0,27	0,29
22	0,53	0,47	0,08	1,72	0,37	0,34	0,25	0,13
36	0,22	0,15	0,10	1,81	1,34	0,56	0,22	1,06
41	0,98	0,60	0,06	1,68	1,50	0,69	0,18	1,18

Tabela 3 – Vazão medida pelo ADCP em planos diversos em cada tanque e média das vazões

Tanque	Vazão medida ADCP (m ³ /s)	Transecto	Vazão média por tanque (m ³ /s)
tq 11	3.117	11001	3.03
tq 11	3.123	11002	
tq 11	3.611	11004	
tq 11	2.185	11006	
tq 11	2.032	11007	
tq 11	3.722	11012	
tq 11	3.265	11016	
tq 11	3.173	11018	
tq 11	2.918	11019	
tq 11	2.654	11020	
tq 11	3.563	11021	
tq 17	3.99	17002	3.23
tq 17	3.43	17012	
tq 17	2.268	17016	
tq 22	2.147	22002	2.20
tq 22	2.047	22006	
tq 22	2.23	22011	
tq 22	2.473	22017	
tq 22	2.43	22023	
tq 22	1.92	22025	
tq 22	1.85	22027	
tq 22	2.48	22023	
tq 37	2.507	37005	2.77
tq 37	3.25	37008	
tq 37	2.618	37010	
tq 37	2.71	37015	
média		2.76	

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma avaliação da vazão e dos campos turbulentos dentro de uma escada para peixes utilizando os equipamentos ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) e ADPC (Acoustic Doppler Current Profiler). Apesar de não ser uma aplicação sugerida pelos fornecedores, os equipamentos permitiram coletar informações importantes sobre o campo de velocidade e turbulência bem como informações de vazão dentro do referido canal hidráulico.

A vazão medida pelo ADCP no tanque menos turbulento foi de $3 \text{ m}^3/\text{s}$, condizente com a vazão da Condição 2 de operação da escada. As velocidades médias pontuais foram menores que 2 m/s apesar de valores instantâneos e pontuais serem superior a esse valor. Atenção deve ser dada à turbulência dos tanques 36 e 41, uma vez que a energia cinética foi da ordem de $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Espera-se que esse trabalho fomente o emprego das técnicas de ADV e ADCP em outras estruturas hidráulicas de porte semelhante a escada para peixes da UHE de Porto Primavera.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio com infraestrutura de equipamentos [Convênio: APQ-05415-23], ao Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG) pelo apoio para participação no evento, pela infraestrutura laboratorial e pela política institucional de bolsas de iniciação científica, a Auren Energia pelo apoio financeiro e institucional ao projeto, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ 308413/2025-3] da autora HAS, do projeto Universal que também permitiu apoio com infraestrutura [Convênio: 456390/2014-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, Steven; LOHRMANN, Atle. Open water test of the SonTek acoustic Doppler velocimeter. 1995, [S.l: s.n.], 1995. p. 188–192.

CABRAL, Hellenesio Carlos Borges. Utilizac, ão de velocímetro acústico doppler (ADV) para avaliaç, ão da concentrac, ão de sedimentos em suspensão. [S.l: s.n.], 2014.

CARVALHO, Thiago Morato. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife -PE, v. 1, n. 1, p. 73-85, 2008.

DURGESH, Vibhav et al. Noise correction of turbulent spectra obtained from acoustic doppler velocimeters. Flow Measurement and Instrumentation, v. 37, p. 29–41, 2014.

Silva, A.T., Lucas, M.C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L.J., Thiem, J.D., Aarestrup, K., Pompeu, P.S., O'Brien, G.C., Braun, D.C. and Burnett, N.J., 2018. The future of fish passage science, engineering, and practice. Fish and Fisheries, 19(2), pp.340-362

LARINIER, M. Fishways- General considerations. In: LARINIER M.; TRAVADE F.; PORCHER J. P., 2002, Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. Bulletin Fr. Pêche Piscic., nº364, cap 2, p. 21-27

Silva, Ana T., Kim M. Bærum, Richard D. Hedger, Henrik Baktoft, Hans-Petter Fjeldstad, Karl Ø. Gjelland, Finn Økland, and Torbjørn Forseth. 2020. "The Effects of Hydrodynamics on the Three-Dimensional Downstream Migratory Movement of Atlantic Salmon." *Science of The Total Environment* 705 (February):135773. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135773>.

Santos, Hersilia Andrade, Ablail Paula Pinheiro, Ludmila Moura Moreira Mendes, and Ricardo Ahouagi Carneiro Junho. 2022. "Turbulent Flow in a Central Vertical Slot Fishway: Numerical Assessment with RANS and LES Schemes." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 148 (7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001682](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001682).

Goodwin, R. Andrew, Marcela Politano, Justin W. Garvin, John M. Nestler, Duncan Hay, James J. Anderson, Larry J. Weber, Eric Dimperio, David L. Smith, and Mark Timko. 2014. "Fish Navigation of Large Dams Emerges from Their Modulation of Flow Field Experience." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (14): 5277–82. <https://doi.org/10.1073/pnas.1311874111>.

Tiffan, Kenneth F., Tobias J. Kock, Craig A. Haskell, William P. Connor, and R. Kirk Steinhorst. 2009. "Water Velocity, Turbulence, and Migration Rate of Subyearling Fall Chinook Salmon in the Free-Flowing and Impounded Snake River." *Transactions of the American Fisheries Society* 138 (2): 373–84. <https://doi.org/10.1577/t08-051.1>.

Enders, Eva C., Michael H. Gessel, James J. Anderson, and John G. Williams. 2012. "Effects of Decelerating and Accelerating Flows on Juvenile Salmonid Behavior." *Transactions of the American Fisheries Society* 141 (2): 357–64. <https://doi.org/10.1080/00028487.2012.664604>.

Castro-Santos, Theodore. 2006. "Modeling the Effect of Varying Swim Speeds on Fish Passage through Velocity Barriers." *Transactions of the American Fisheries Society* 135 (5): 1230–37. <https://doi.org/10.1577/T05-262.1>.