

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DAS TENSÕES DE REYNOLDS DE UMA ESCADA DE PEIXES DO TIPO PISCINA COM VERTEDOR PARA ATENDER DEMANDAS DE ESPÉCIES NEOTROPICAIS

Bernardo Alan de Freitas Duarte¹ & Hersília de Andrade e Santos²

Resumo – Mecanismos de transposição de peixes são estruturas hidráulicas com o objetivo de facilitar a passagem de peixes migradores através de obstáculos, como as barragens. Dentre os diversos tipos, se destacam as escadas de peixes: canais hidráulicos que possuem uma seqüência de piscinas separadas por anteparos que promovem a dissipação de energia permitindo assim a subida dos peixes. A fim de compreender como o escoamento influencia a passagem dos peixes pelas escadas, muitos trabalhos na literatura apresentam avaliações de parâmetros hidráulicos, como velocidade média, ao longo dos canais. Recentemente, a tensão de Reynolds tem sido apresentada como variável relevante na eficiência de escadas de peixes. O objetivo do presente trabalho foi analisar as tensões de Reynolds no modelo piscina com vertedor. Para isto foram adaptados anteparos no canal hidráulico do CEFET-MG, realizadas medições de velocidade e posteriormente testes com a espécie *Leporinus Reinhardti*. Foi observado que essa espécie preferiu áreas com valores de tensões de Reynolds próximo a zero e que o escoamento gerado pelo orifício do anteparo é capaz de atrair peixes para região à jusante do mesmo.

Abstract – Fishways are hydraulic structures to allow fish migration by the river block, such as dams. The fish ladders are one of the most built fishways and they are a hydraulic channel where some slots are introduced for energy water dissipation. Many studies have been done to understand how the hydraulic flow of fish ladder is able to influence the fish passage. Recently, the Reynolds shear-stress has been presented as the most important parameter to evaluate the fish efficiency. The aim of this paper was to analyze the Reynolds shear-stress and show if it is an optimal hydraulic variable for preview the fish behaviour in fishways. The measurements and experiments were conducted in a hydraulic channel in CEFET-MG. The neotropical specie *Leporinus reinhardti* was chosen and it preferred areas of lowest Reynolds shear-stress. It was verified the orifice was able to create flow which attracted individuos of *Leporinus reinhardti*.

Palavras-Chave – Espécies neotropicais de peixes; Tensões turbulentas; Piscina com vertedor.

¹ Graduando em Engenharia de Produção Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, av. Amazonas 7675, Nova gameleira, Belo Horizonte, be.duarte@hotmail.com

² Professora do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, av. Amazonas 7675, Nova gameleira, Belo Horizonte, hsantos@civil.cefetmg.br

INTRODUÇÃO

Desde as mais remotas civilizações, os cursos d'água têm sofrido os efeitos da ação antrópica, direta ou indiretamente. Com o passar do tempo, as intervenções no escoamento dos rios começaram a ser maiores, modificando a sua dinâmica e até sua fauna associada (McAllister *et al.*, 1997). Interrupções como as provocadas pelas barragens causam enormes danos à biota local, afetando diretamente as espécies migradoras, que necessitam deslocar ao longo do rio em alguma fase de seu ciclo de vida (Sale, 1985).

Há mais de dois séculos, mecanismos de transposição de peixes têm sido construídos para facilitar a migração de peixes à montante de obstáculos. Em países temperados observa-se um grande sucesso na migração de peixes anádromos por esses mecanismos (Clay, 1995), indicando que essas estruturas são positivas ao ecossistema (Yagci, 2010). Por outro lado, há uma escassez de estudos que avaliem a atual situação desses mecanismos para ecossistemas tropicais. No Brasil, a grande biodiversidade da fauna aquática aumenta a complexidade de se avaliar o grau de eficiência desses mecanismos de transposição.

Escadas de peixes foram amplamente construídas para promover a mitigação de impactos causados pelos barramentos. Entretanto, mesmo com a implantação desses mecanismos, algumas espécies não conseguem transpor esses obstáculos e realizar a migração, que é essencial para a manutenção do patrimônio genético (Mallen-Cooper e Brand, 2007).

Muitos estudos avaliaram e descreveram o escoamento por meio de campos de velocidade, cálculos de energia cinética e por cálculos de dissipação de energia média, dentre eles se destacam Rajaratnam *et al.* (1986) e Katopodis (1992). Apesar de haver um grande número de trabalhos que avaliaram o escoamento nesses mecanismos de transposição, não há definições sobre qual variável hidráulica é mais importante para ser considerada no projeto de implantação dessas obras para atender às demandas de espécies de peixes. Para isso, são de grande relevância os estudos comportamentais baseados em engenharia, porque essa multidisciplinaridade permite a união de conhecimentos para a resolução de um problema real.

Neste trabalho, a turbulência foi modelada no escoamento de uma escada de peixes do tipo piscina com vertedor por meio das tensões de Reynolds. As tensões de Reynolds são também chamadas de tensões turbulentas e representam a força por unidade de área que surge quando duas massas de água de velocidades paralelas se movem uma em relação à outra (Silva *et al.*, 2010).

Após as análises hidráulicas foram realizados experimentos com indivíduos de uma espécie neotropical para verificar a relação entre o comportamento dos peixes e os dados hidráulicos do escoamento.

O objetivo desse trabalho é apresentar o campo de tensões de Reynolds em uma escada de peixes do tipo piscina com vertedor com configuração em zig-zag e indicar a viabilidade da utilização da tensão de Reynolds como variável de estudo em projetos de implantação de mecanismos de transposição de peixes.

Escada de peixes do tipo piscina com vertedor

Escadas de peixes são estruturas largamente construídas para permitir a passagem de espécies migradoras através de barreiras, como as barragens (Clay, 1995). Essas estruturas são constituídas de canais com obstruções internas para redução da velocidade da água, que promovem o processo de dissipação da energia do escoamento e conseqüentemente permitem a transposição do peixe dentro da sua capacidade natatória (Larinier, 2002).

A escada de peixe do tipo piscina com vertedor é um dos modelos mais antigos de escada, que consiste em uma seqüência de piscinas separadas em intervalos regulares por anteparos (Silva *et al.*, 2009) (FIG. 1).



Figura 1: Escada de peixes do tipo piscina com vertedor na usina de Lajeado (Tocantins- Brasil)

Os anteparos da escada podem ser compostos com orifícios na base inferior e vertedores na base superior (Katopodis, 1992). Neste trabalho o modelo construído foi baseado no protótipo da escada de peixes da usina de Lajeado (Tocantins, Brasil). A escada de peixes de Lajeado possui mais de 850,0m de comprimento, 5,0m de largura, inclinação média de 5,0% e velocidade média de 0,44m/s com uma vazão média de 3,3 m³/s (Agostinho *et al.*, 2007). O modelo reduzido construído

em um canal hidráulico neste trabalho, possui configuração semelhante à escada de Lajeado, com vertedores e orifícios posicionados de modo alternado (em zig-zag) entre anteparos consecutivos.

Tensão de Reynolds

A tensão de Reynolds, também conhecida como tensão turbulenta, é uma variável hidráulica relacionada à turbulência, especialmente ligada às tensões cisalhantes que surgem no escoamento. Apesar de possuir efeito matemático de tensão, a tensão de Reynolds é em essência um termo de aceleração convectiva (White, 2004).

De acordo com Fox *et al.* (2004), a tensão de Reynolds é um tensor formado por 6 componentes simétricas, que formam três planos: o plano horizontal (XY), o plano vertical (XZ) e o plano transversal (YZ).

Neste trabalho foi calculada somente a componente horizontal da tensão de Reynolds, pois esta é a mais significativa em termos de valores absolutos e é a mais representativa no comportamento dos peixes (Silva *et al.*, 2010). Define-se a componente horizontal da tensão de Reynolds como (White, 2004):

$$\tau = \rho \cdot u' \cdot v' \quad (1)$$

Onde: ρ é a massa específica da água (Kg/m^3), u' é a variação de velocidade no eixo X (m/s) e v' é a variação de velocidade no eixo Y (m/s).

Silva *et al.* (2010) apontaram a tensão de Reynolds como uma variável hidráulica determinante no comportamento de espécies migradoras em mecanismos de transposição de peixes, pelo fato dos indivíduos evitarem áreas turbulentas.

Espécies de peixes neotropicais

O Brasil apresenta uma das maiores biodiversidades de organismos aquáticos do mundo e todo seu território é cercado por recursos hídricos onde residem estes indivíduos (Godinho e Godinho, 1994). Os peixes podem ser classificados como migradores ou não migradores. A migração é um fenômeno que certas espécies apresentam com o objetivo de reproduzir ou atender outras necessidades comportamentais. Os peixes migradores podem ser classificados como diádromos, quando migram entre rio e mar; potamódromos, quando migram entre corpos de água doce e oceanódromos quando migram em águas marinhas. Os peixes diádromos podem ser anádromos, quando vivem geralmente no mar, mas se reproduzem em água doce; catádromos,

quando vivem em água doce, mas reproduzem no mar e os anfídomos, quando migram por outros aspectos não relacionados à reprodução, como necessidades comportamentais (Porcher e Travade, 2002).

Os peixes migradores possuem seu percurso de migração interrompido ao encontrar um barramento. Para isso, as escadas de peixes buscam permitir a passagem dos indivíduos junto aos barramentos. Neste trabalho, utilizou-se a espécie *Leporinus Reinhardti*, para se estudar o comportamento desses indivíduos na escada de peixes e verificar se as tensões de Reynolds podem explicar esse comportamento.

METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Máquinas Hidráulicas do CEFET-MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais), onde há um canal hidráulico construído em concreto armado com 4,0m de comprimento, 0,86m de largura e 4,5% de inclinação. Para a construção do modelo da escada do tipo piscina com vertedor foram utilizados anteparos de PVC. Após a instalação dos anteparos, foram realizadas as medições de velocidade.

Estudos com modelos reduzidos são freqüentes em mecânica dos fluidos por serem de grande eficiência e praticidade (Viana e Martinez, 2006). O dimensionamento dos anteparos do modelo reduzido, a serem colocados no canal do CEFET-MG, foi baseado no protótipo da escada de peixes de Lajeado na escala de 1:3,5. Adotou-se também a configuração dos anteparos em zig-zag (a mesma configuração da escada de Lajeado), onde os orifícios e vertedores se alternam de posições e geram um escoamento em S, que é evidenciado pela formação de jatos e vórtices (Kim, 2001).

Assim, de acordo com as dimensões do canal e com as relações de semelhança entre protótipo e modelo, foi determinado que a escada de peixes fosse constituída por quatro anteparos, formando assim três piscinas para análises dos dados. A numeração das piscinas seguiu a ordem de montante para jusante (FIG. 2).



Figura 2 – Modelo construído no canal do laboratório do CEFET-MG

Inicialmente, foram coletadas as componentes horizontais de velocidade média e máxima pontual nas direções X e Y. Em seguida foi calculado o valor da tensão de Reynolds para cada valor pontual. Após a coleta e cálculo dos dados hidráulicos, foram realizados experimentos com a espécie neotropical *Leporinus Reinhardti*, presente na bacia do Rio São Francisco. Finalmente, foram realizadas análises qualitativas e quantitativas do campo de tensões de Reynolds e a comparação com os dados biológicos observados.

Medições de velocidades

A análise do escoamento foi realizada pela fixação de 104 pontos de medição de velocidade em cada piscina da escada (FIG. 3). Foram coletadas velocidades máximas e médias pontuais nas direções X e Y nas alturas de 10 cm e 20 cm, a partir do plano do chão do canal, nas três piscinas para as vazões de 20l/s e 35l/s.

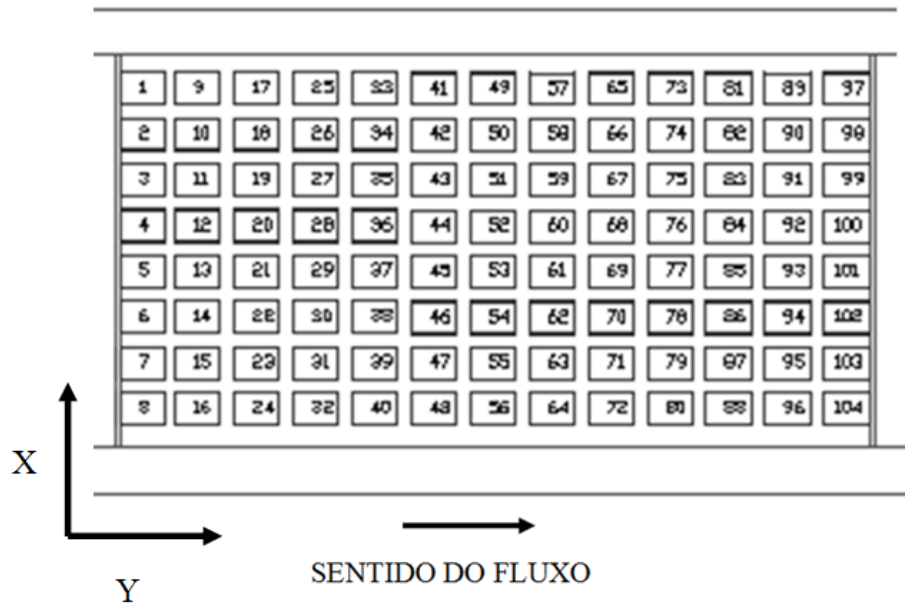


Figura 3: Pontos de medição de velocidade em uma piscina

Para as medições de velocidades foi utilizado um velocímetro do tipo molinete com processador eletrônico acoplado com precisão de 0,05 m/s (FIG. 4). Para controle da vazão, foi instalado um medidor de vazão eletromagnético juntamente ao sistema de recirculação de água do canal hidráulico.

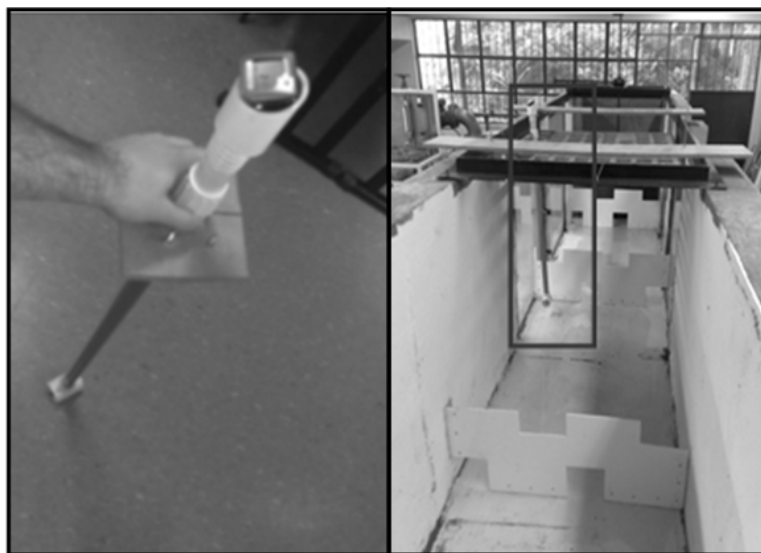


Figura 4: Velocímetro e posicionador no modelo reduzido

Foi criado um posicionador para sustentar o velocímetro na altura e posição em cada um dos 104 pontos durante as medições de velocidade média e máxima. Para isso, utilizou-se uma tábua de madeira de compensado naval e foram realizados furos para permitir a sustentação do velocímetro.

Com o objetivo de verificar se a configuração da escada de peixes do tipo piscina com vertedor adotada permite uma adequada dissipação de energia, foi calculada a dissipação de energia por volume. A dissipação de energia está relacionada à turbulência média e aeração do tanque (Larinier, 1998). O cálculo da dissipação de energia foi calculado para a piscina dois, por ser a mais estável hidraulicamente. De acordo com Bell (1973), esse valor não deve superar 0,191Kw/m³. A fórmula utilizada, de acordo com Rajaratnam *et al.* (1986) foi:

$$k = \frac{Q \cdot \gamma \cdot \Delta h}{B \cdot L \cdot y} \quad (2)$$

onde Q é a vazão (m³/s), γ é o peso específico da água (N/m³), B é a largura do tanque (m), L é o comprimento do tanque (m), Δh é a perda de carga (m/m) e y é a altura média da lamina d'água (m).

Cálculo das tensões de Reynolds

Para o cálculo das tensões foi utilizada a fórmula (White, 2004), onde a tensão é dada em Pascal:

$$\tau_{xy} = \rho \cdot u' \cdot v' \quad (3)$$

Onde: ρ é a massa específica da água (Kg/m³), u' é a variação de velocidade na direção X (m/s) e v' é a variação de velocidade na direção Y (m/s).

Para o cálculo da tensão de Reynolds, o termo que representa a variação de velocidade foi considerado como a diferença entre a velocidade máxima pontual e a média pontual (White, 2004):

$$u' = u_{\max} - u_{\text{med}} \quad (4)$$

$$v' = v_{\max} - v_{\text{med}} \quad (5)$$

onde: u_{\max} e v_{\max} são as velocidades máximas pontuais em X e em Y, respectivamente. u_{med} e v_{med} são as velocidades médias pontuais em X e em Y, respectivamente.

Experimentos com indivíduos da espécie neotropical

Os indivíduos da espécie *Leporinus Reinhardti* foram coletados no município de Três Marias (MG) e transportados até o laboratório de Máquinas Hidráulicas no CEFET-MG, em Belo Horizonte. Os indivíduos foram mantidos em aquários com oxigenação artificial e controle de temperatura. Após uma semana dos experimentos, os indivíduos eram transportados ao município de Três Marias e restabelecidos em seu habitat natural.

Foram realizados 6 experimentos para a vazão de 20l/s e outros 6 para a vazão de 35l/s. Cada experimento tinha duração de uma hora e em cada experimento foram utilizados 5 indivíduos. Os testes foram gravados por meio de uma câmera no topo do canal hidráulico e outra na lateral. As gravações foram realizadas na piscina dois, por possuir parede de vidro na lateral permitindo a gravação lateral e por ser a mais estável hidráulicamente. Após as gravações, as posições em que os indivíduos permaneciam eram quantificadas e sua frequência analisada para verificar a existência de áreas de preferências no escoamento. Para essa análise, foi necessário desenhar no chão do canal uma malha quadriculada que indicavam posições por meio de retângulos, que eram as mesmas utilizadas nas medições de velocidades, indicadas na figura três.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi observado que para o modelo reduzido, a dissipação de energia não ultrapassou o valor de $0,191\text{Kw/m}^3$ (FIG. 5), recomendado por Bell (1973).

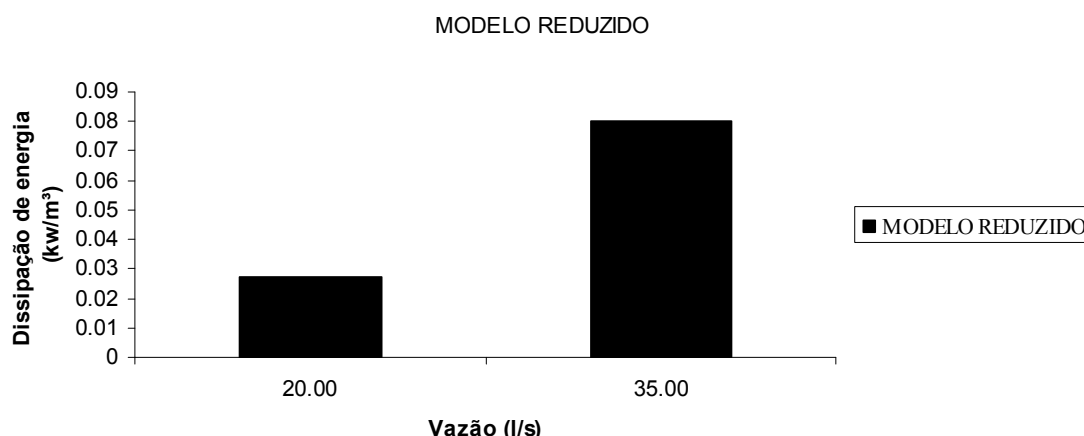


Figura 5: Dissipação de energia por volume na piscina 2 do modelo reduzido

Em seguida, o valor de dissipação de energia do modelo reduzido foi calculado por semelhança de Froude, para um protótipo de 3,0m de largura (FIG. 6). Para essa situação também se observou que a dissipação não ultrapassou o valor limite recomendada na literatura. Dessa forma, a configuração adotada mostrou-se adequada para o modelo reduzido em estudo e também para um protótipo de maior porte.

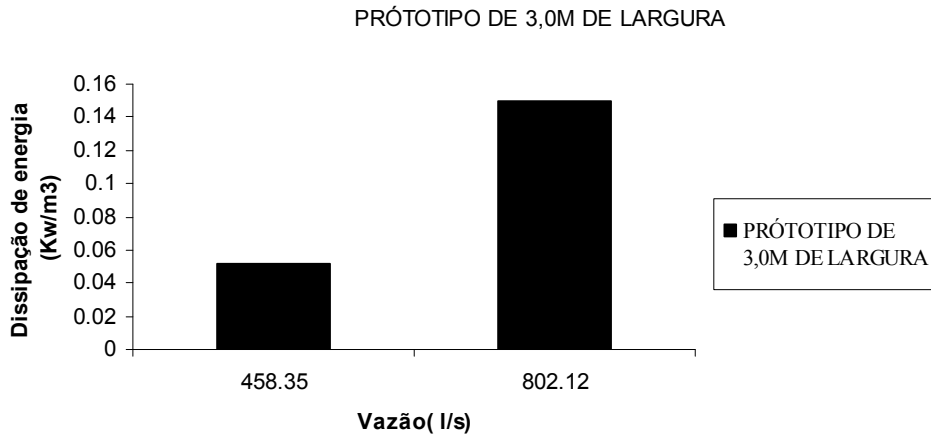


Figura 6: Dissipação de energia para um protótipo de 3,0m de largura

Foi observado que as tensões de Reynolds apresentaram valores baixos para a vazão de 20l/s, com cerca de 50% dos valores entre 0 Pa e 1 Pa. (FIG. 7) Enquanto que para a vazão de 35l/s, as tensões de Reynolds apresentaram valores um pouco maiores, com cerca de 50% dos valores compreendidos entre 0 Pa e 5 Pa. (FIG. 8)

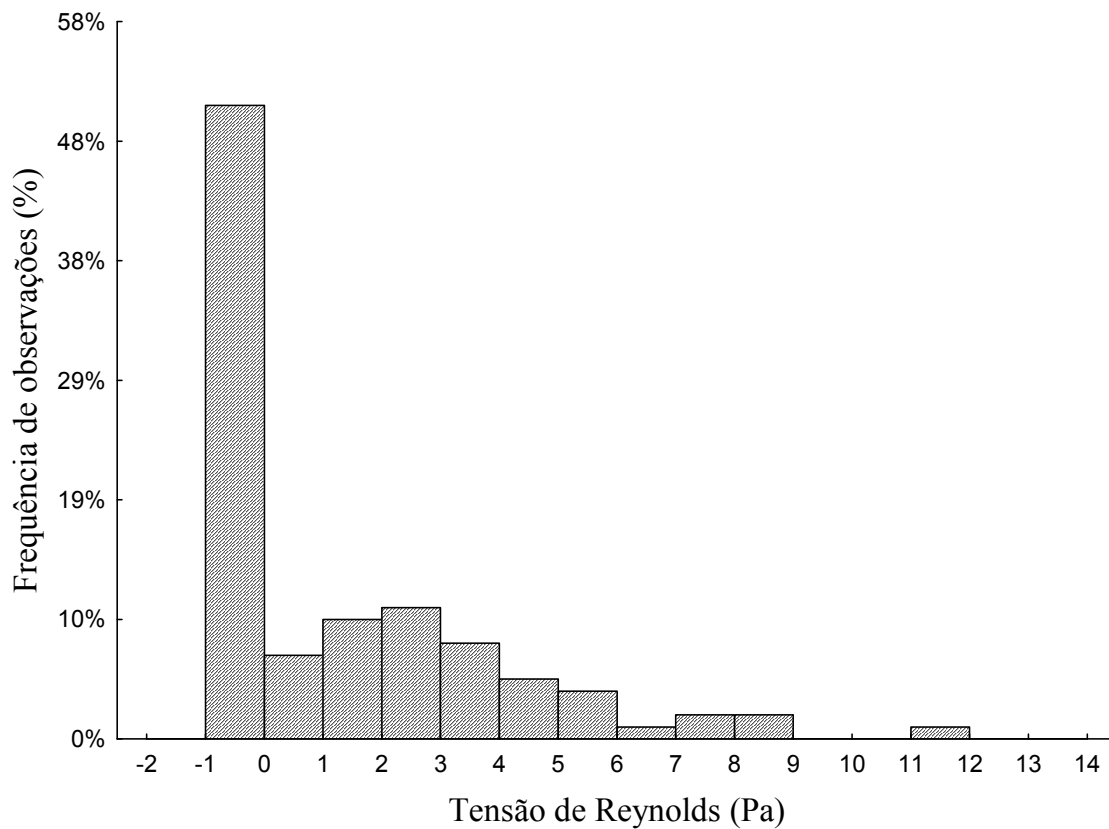


Figura 7: Histograma dos valores de tensão de Reynolds (Pa) para a piscina 2 na vazão de 20l/s

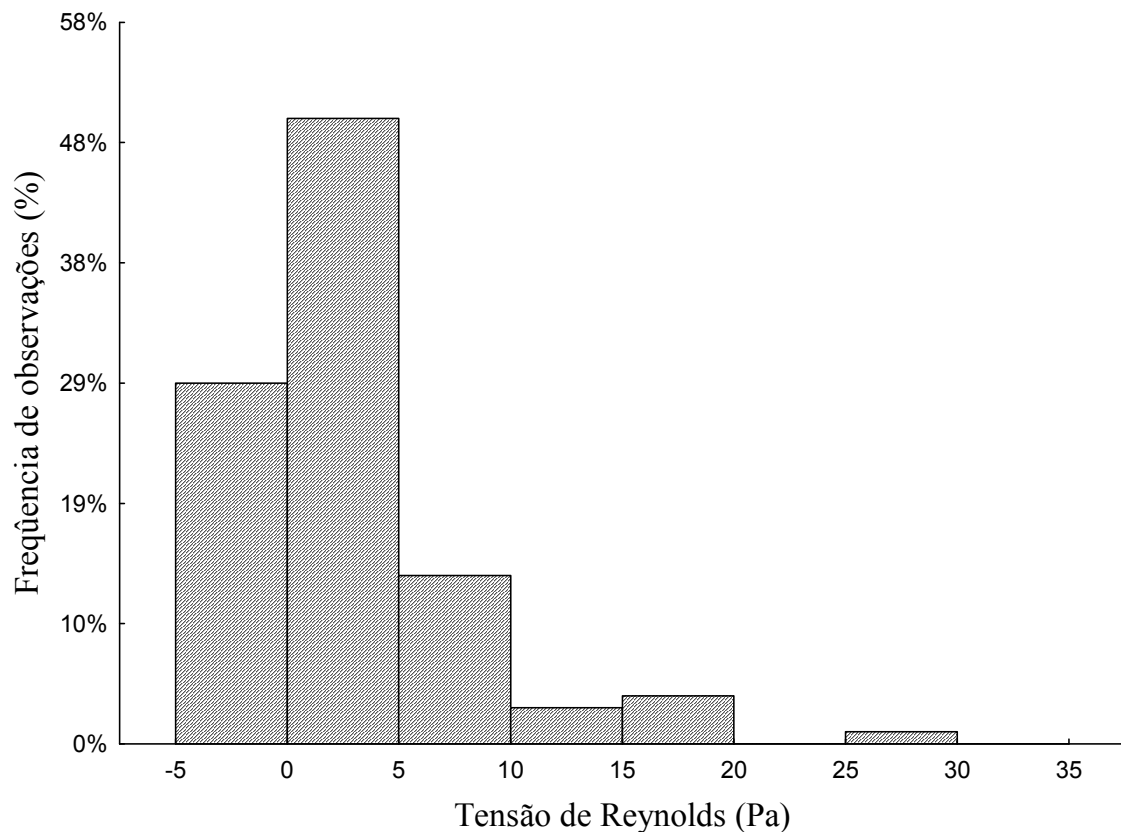


Figura 8: Histograma dos valores de tensão de Reynolds (Pa) para a piscina 2 na vazão de 35l/s

Com relação aos experimentos de peixes, observou-se que os indivíduos permaneceram a maior parte do tempo em pontos com baixos valores de tensão de Reynolds. Esse resultado corrobora o encontrado por Silva *et al.* (2010). Nos experimentos realizados para a vazão de 20l/s, foi observado que em quase 90% do tempo, os indivíduos ocuparam posições com valores de tensão de Reynolds nulos (FIG. 9). Para a vazão de 35l/s, os indivíduos permaneceram durante cerca de 40% do tempo em pontos com valores de tensão de Reynolds nulos (FIG. 10).

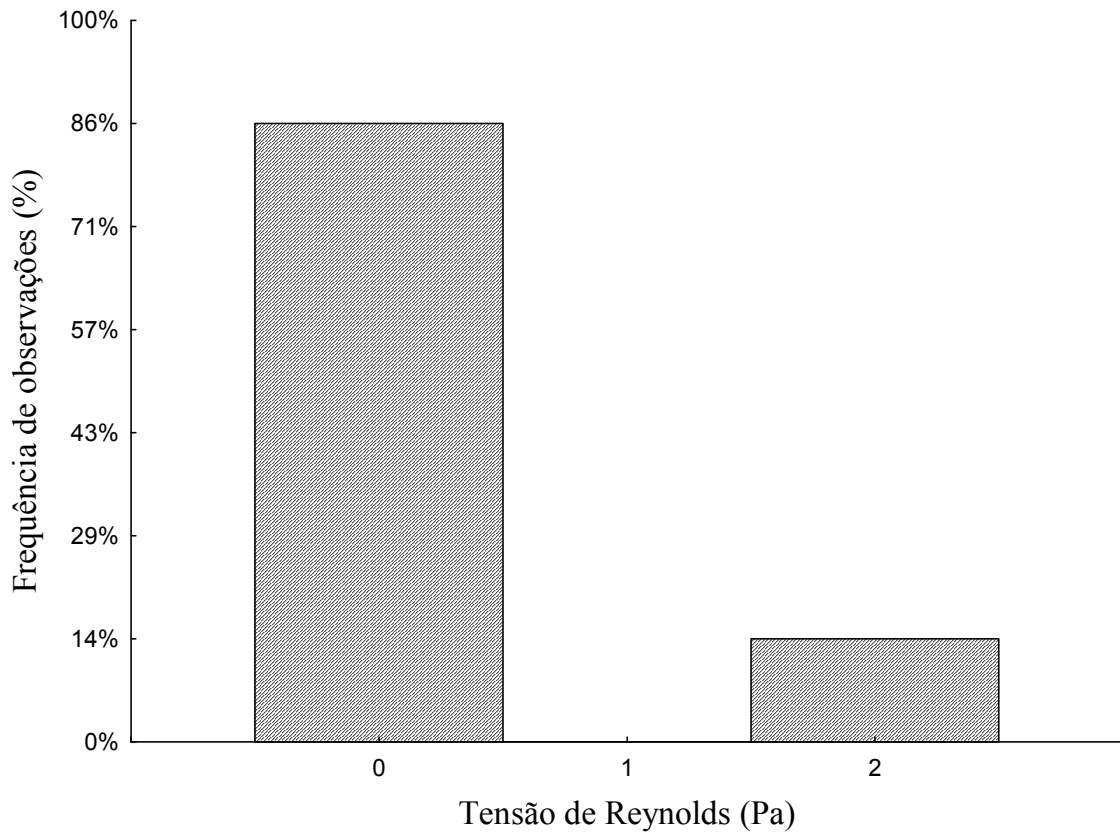


Figura 9: Histograma dos valores de tensão de Reynolds onde os peixes estavam submetidos à vazão de 20l/s

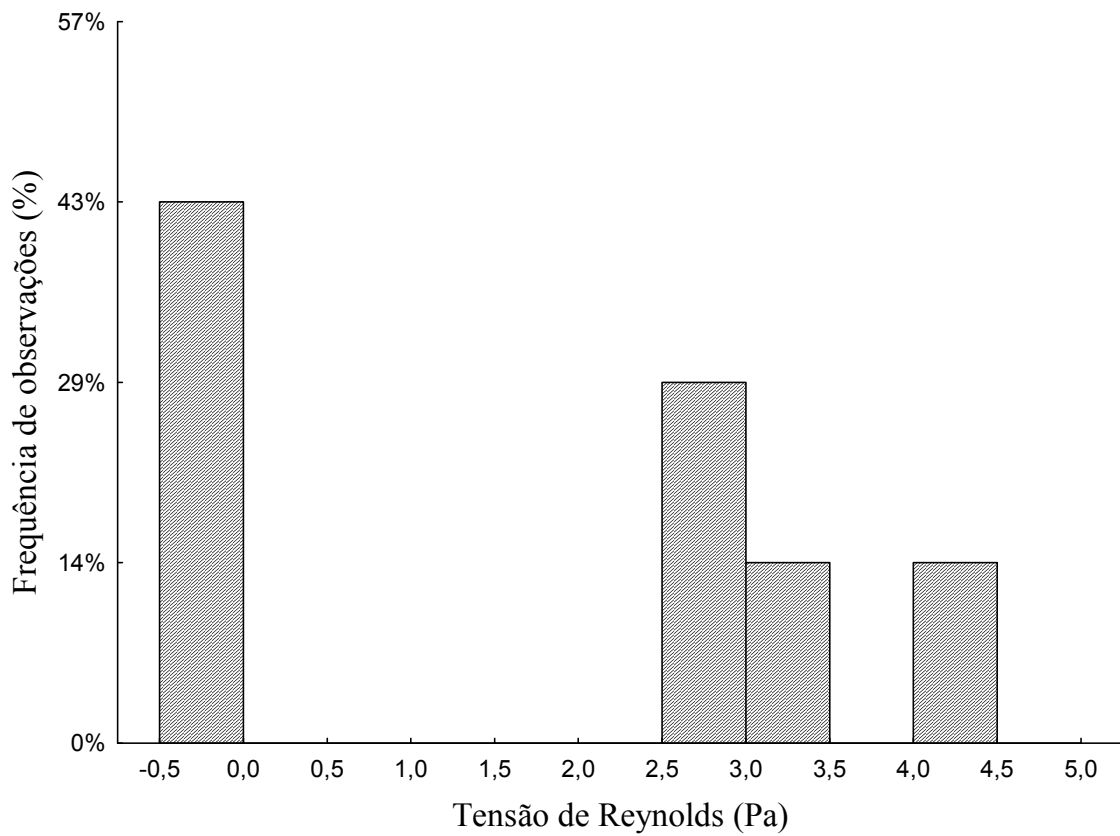


Figura 10: Histograma dos valores de tensão de Reynolds onde os peixes estavam submetidos à vazão de 35l/s

É importante destacar que a média dos valores de tensões de Reynolds foram de aproximadamente 2,5 Pa para a vazão de 20l/s e de 4,0 Pa para a vazão de 35l/s (FIG. 11). Por outro lado, os valores de tensões de Reynolds onde os peixes permaneceram a maior parte do tempo possuem média próxima de 0,3 Pa para a vazão de 20l/s e próxima de 2,0 Pa para a vazão de 35l/s (FIG. 12).

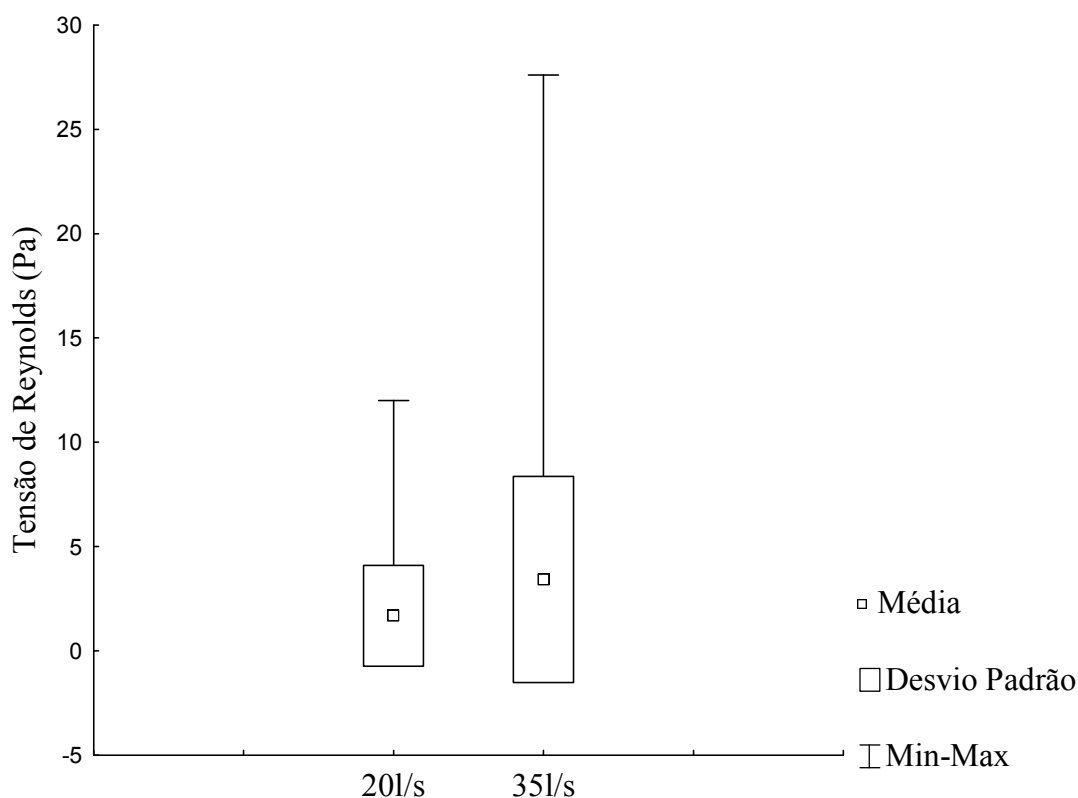


Figura 11: Gráfico de tensões de Reynolds (Pa) para as vazões de 20l/s e 35l/s na piscina 2

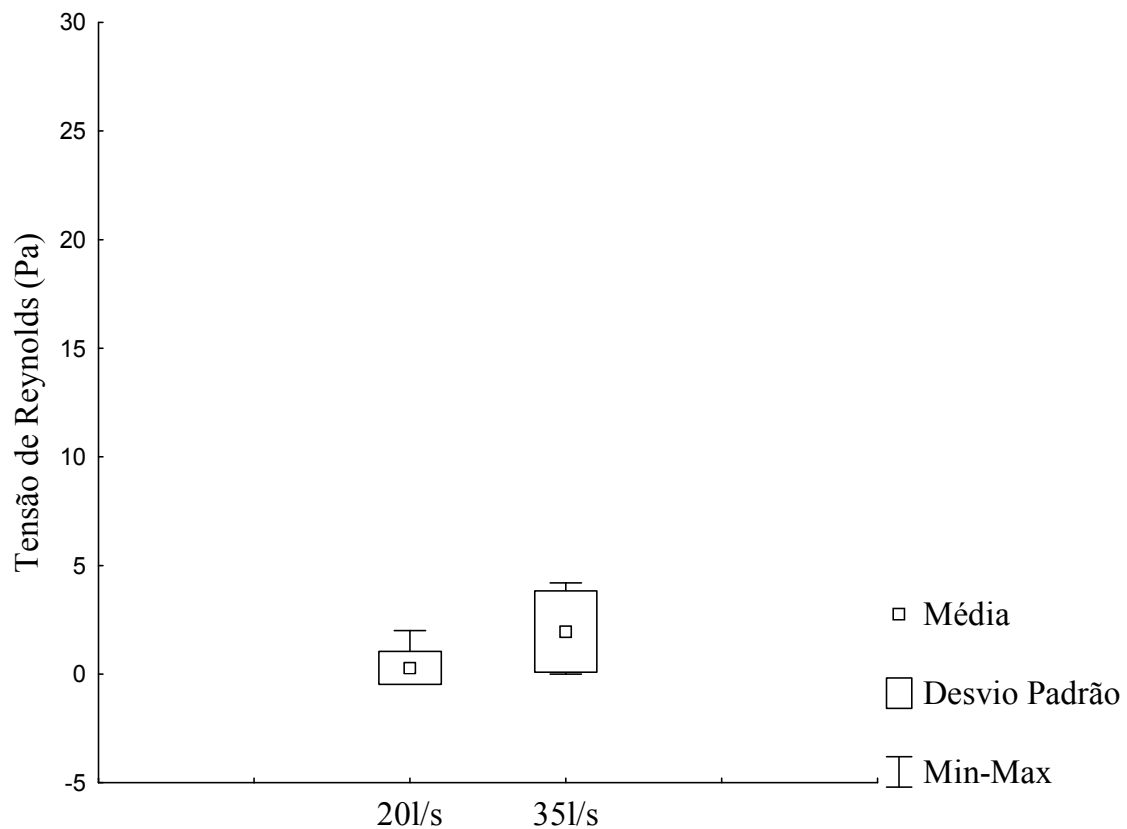


Figura 12: Gráfico de tensões de Reynolds (Pa) nas posições onde os peixes permaneceram nos testes de 20l/s e 35l/s na piscina 2

Dessa forma, pode-se observar que os peixes permaneceram a maior parte do tempo em posições com baixos valores de tensão de Reynolds, inclusive valores mais baixos que as médias das tensões de Reynolds da piscina.

As gravações dos experimentos dos peixes indicaram que existe uma área de preferência bem definida. Em cerca de 80% do tempo tanto para a vazão de 20l/s quanto para a de 35l/s, os peixes permaneceram na área hachurada da figura 13. Essa área de preferência se localiza ao longo da direção do fluxo do escoamento que passa pelo orifício do canto, representado por seta contínua. O fluxo do vertedor é indicado por seta pontilhada.

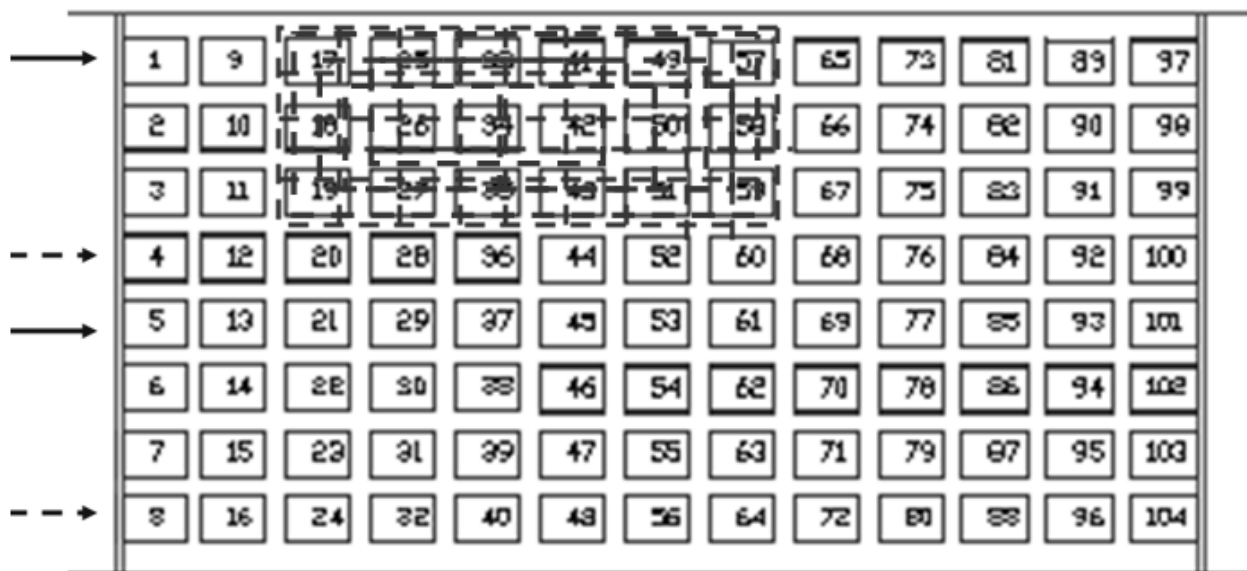


Figura 13: Área de preferência dos peixes, em hachura, durante os experimentos.

CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou a conclusão de que a escada de peixes do tipo piscina com vertedor, com a configuração dos anteparos em zig-zag, possui adequada dissipação de energia por volume, tanto para o modelo como para o protótipo quando operadas nas faixas de vazões estudadas.

Foi observado que a espécie *Leporinus reinhardtii* ocupou, na maior parte do tempo, posições onde os valores de tensão eram baixos. Esse resultado corrobora o encontrado por Silva *et al* (2010), e ratifica que os peixes tendem a evitar a ocupar áreas com altos valores de tensões de Reynolds.

Para este modelo, verificou-se que existe uma área de preferência da espécie *Leporinus reinhardtii*, onde se concentra o escoamento gerado pelo orifício lateral. Nesta área, há grande concentração de baixos valores de tensões de Reynolds.

Os resultados desse trabalho indicam que a componente horizontal da tensão de Reynolds pode ser uma variável importante a ser considerada nos projetos de dimensionamento de mecanismos de transposição de peixes, pois indica preferência de comportamento dos indivíduos.

AGRADECIMENTOS

Somos gratos ao apoio técnico do Laboratório de Máquinas Hidráulicas do CEFET-MG e também agradecemos ao apoio financeiro da FAPEMIG e do CNPq para a realização desse projeto.

BIBLIOGRAFIA

AGOSTINHO, C.S.; AGOSTINHO, A.A.; PELICICE, F.; ALMEIDA, D.A. de; MARQUES, E.E. (2007). “*Selectivity of fish ladders: a bottleneck in Neotropical fish movement*”. *Neotropical ichthyology* 5(2), pp. 205-213.

BELL, M.C. (1973). “*Fisheries Handbook of Engineering Requeriments and Biological Criteria*”. Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, Oregon, pp. 490.

CLAY, C.H. (1995). “*Design of Fishways and Other Fish Facilities*”. Second Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida. pp. 248.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. (2004). *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. LTC, Rio de Janeiro, Brasil.

GODINHO, H.P.; GODINHO, A.L. (1994). “*Fish communitities in southeeastern Brazilian river basins submitted to hydroelectric impoundments*”. *Acta Limnologica Brasiliensia* 5, pp. 187-197.

KATOPODIS, C. (1992). “*Introduction to fishway design*”, Freshwater Institute, Dept. of Fisheries and Oceans, Winnipeg, Canada.

KIM, J. H. (2001). “*Hydraulic Characteristics by Weir Type in a Pool-Weir Fishway*”. *Ecological Engineering* 16, pp. 425-433.

LARINIER, M. (2002). “*Fishways: General Considerations*”. *Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture* 364, pp. 21-77.

LARINIER, M. (1998). “*Upstream and Downstream Fish Passage Experience in France*”. *Fish Migration and Fish Bypasses*, pp. 127-145.

MALLEN-COOPER, M.; BRAND, D.A. (2007). “*Non-salmonids in a salmonid fishway: what do 50 years of data tell us about past and future fish passage?*”. Fisheries Management and Ecology 14, pp. 319-332.

MCALLISTER, D.E.; HAMILTON, A.L.; HARVEY, B. (1997). “*Global freshwater biodiversity: striving for the integrity of freshwater ecosystems*”. Sea Wind 11(3), pp. 1-142.

PORCHER, J.P.; TRAVADE, F. (2002). “*Fishways: biological basis, design criteria and monitoring*”. Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture, pp. 9–20.

RAJARATNAM, N.; VAN DER VINNE, G.; KATOPODIS, C. (1986). “*Hydraulics of vertical slot fishways*”. Journal of Hydraulic Engineering 112, pp. 909-917.

SALE, M.J. (1985). “*Aquatic ecosystem response to flow modification: an overview of the issues*”. Proceedings of the Symposium on small hydropower and fisheries, pp. 25-31.

SILVA, A.T.; 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 an experimental pool-type fishway*”. River Research and Applications 27, pp. 360-373.

SILVA, A.T.; SANTOS, J.M.; FRANCO, A.C.; FERREIRA, M.T.; PINHEIRO, A.N. (2009). “*Selection of Iberian barbel Barbus bocagei (Steindachner, 1864) for orifices and notches upon different hydraulic configurations in an experimental pool-type fishway*”. Journal of Applied Ichthyology 25, pp. 173-177.

VIANA, E.M.F.; MARTINEZ, C.B. (2006). “*Estudo em Modelo Reduzido do Campo de Velocidades em Mecanismo de Transposição de Peixes do Tipo Ranhura Vertical*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 12, pp. 91-105.

WHITE, F.M. (2004). *Mecânica dos Fluidos*. 4ª edição, Editora MacGraw Hill, Rio de Janeiro, Brasil.

YAGCI, O. (2010). “*Hydraulic aspects of pool-weir fishways as ecologically friendly water structure*”. Ecological Engineering 36 (1), pp. 36-46.