



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
NOVOS
DESAFIOS

INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE, ALTURA DA QUEDA E CAUDAL NO COMPORTAMENTO DE TRANSPOSIÇÃO DE PEIXES POTAMÓDROMOS ATRAVÉS DE AÇUDES DE FACES VERTICAIS

Susana Dias, AMARAL¹; Paulo, BRANCO²; Maria Teresa, FERREIRA³; António Nascimento, PINHEIRO⁴; José Maria, SANTOS⁵

¹ Mestre em Gestão e Conservação dos Recursos Naturais, CEF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 1349-017 Lisboa, samaral@isa.ulisoa.pt, +351 213653492

² Doutor em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais, CEF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 1349-017 Lisboa, pjbranco@isa.ulisoa.pt, +351 213653489

³ Professora Catedrática, CEF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 1349-017 Lisboa, terferreira@isa.ulisoa.pt, +351 213653487

⁴ Professor Catedrático, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisboa, antonio.pinheiro@tecnico.ulisoa.pt, +351 218418150

⁵ Doutor em Engenharia Florestal, CEF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 1349-017 Lisboa, jmsantos@isa.ulisoa.pt, +351 213653489

Resumo

Inúmeros estudos têm reportado sérias alterações nas comunidades piscícolas fortemente relacionadas com a presença de barreiras transversais ao longo dos cursos de água. Mesmo os pequenos açudes, considerados como barreiras *a priori* permeáveis à movimentação dos peixes, podem provocar sucessivas perdas de conectividade com consequências negativas na ictiofauna. Embora alguns parâmetros considerados como preponderantes na transposição de pequenos açudes tenham vindo a ser estudados, pouco se sabe sobre se, e como, esses parâmetros interagem para induzirem um comportamento de transposição de natação ou de salto nas espécies ciprinícolas potamódromas.

Com este trabalho pretendeu-se avaliar o comportamento de transposição (natação vs. salto) do barbo-comum (*Luciobarbus bocagei*) face a um pequeno açude experimental de faces verticais, considerando a interação dos parâmetros: profundidade de água a jusante do açude (D), queda a transpor (H), e caudal (Q). Inicialmente foram testadas 16 configurações (D×H) considerando a combinação de D (10, 20, 30 e 50 cm) e H (5, 10, 15 e 25 cm) e mantendo um caudal constante de 50 l/s. Posteriormente, selecionando a configuração que apresentou maior sucesso de passagem, foram testados os caudais de 25, 75 e 100 l/s.

Os resultados revelaram que o comportamento de transposição do barbo-comum é altamente dependente das configurações D×H testadas (teste de Freeman-Halton, *p*

$<0,0001$), e que ambos os fatores D e H, e a sua interação, estão significativamente correlacionados com o tipo de comportamento de passagem para montante adotado (PerMANOVA, $p < 0,01$). A maioria das configurações foram transpostas por natação, à exceção das configurações com $H = 25$ cm. Quanto ao parâmetro Q, não se verificou que o comportamento de transposição fosse influenciado pelo caudal testado (teste de Freeman-Halton, $p > 0,05$). Estes resultados poderão ser úteis na definição de medidas de requalificação de pequenos açudes, adequadas às capacidades e comportamentos de passagem para montante de várias espécies.

Palavras-chave: Pequenos açudes, espécies ciprinícolas potamódromas, comportamento de transposição, natação vs. salto, ecohidráulica.

Tema: Investigação em hidráulica e recursos hídricos.

1. INTRODUÇÃO

A influência de barreiras transversais (barragens, pequenos aproveitamentos hidráulicos, ou açudes) nas comunidades piscícolas tem vindo a ser amplamente estudada e os resultados revelam que, devido à fragmentação imposta por essas infraestruturas, têm ocorrido alterações drásticas na estrutura, diversidade e manutenção de populações piscícolas (Aarts et al., 2003; Branco et al., 2012; Nilsson et al., 2005). Mesmo os pequenos açudes, que têm sido considerados como barreiras à partida permeáveis à livre movimentação dos peixes, podem provocar sucessivas perdas de conectividade (Baudoin et al., 2014; Branco et al., 2017) com consequências negativas para as populações piscícolas, principalmente para as que necessitam de efetuar migrações, como é o caso das espécies ciprinícolas potamódromas (Baudoin et al., 2014; Lucas e Baras, 2001).

Embora algumas investigações, focadas maioritariamente em espécies salmonícolas, tenham estudado o efeito de determinados parâmetros considerados como preponderantes no sucesso de passagem para montante de pequenos açudes, como a profundidade de água a jusante do açude, a altura a transpor, e o caudal (Amaral et al., 2016; Kondratieff e Myrick, 2006; Ovidio et al., 2007), pouco se sabe sobre se, e como, estes parâmetros interagem para induzirem o comportamento de passagem aquando da transposição de tais obstáculos. Assim, afigura-se fundamental desenvolver mais estudos, particularmente para as espécies com capacidades natatórias menos desenvolvidas, como é o caso das espécies ciprinícolas potamódromas (Baudoin et al., 2014; Katopodis e Gervais, 2016; Silva et al., 2009), de forma a conseguir identificar as possíveis condições hidrodinâmicas que estimulam os espécimes a adaptar o seu comportamento de passagem para montante, adotando o salto sobre o obstáculo ou a natação pela coluna de água que se forma na face jusante do açude, para transpor estas pequenas barreiras.

Com este trabalho pretendeu-se avaliar o comportamento de passagem para montante (natação vs. salto) do barbo-comum (*Luciobarbus bocagei*), umas das espécies ciprinícolas potamódromas mais abundantes nos rios Ibéricos, e representativa de outras 8 espécies do género *Barbus* e *Luciobarbus* (Santos et al., 2014), ao transpor um pequeno açude de faces verticais, considerando a interação dos parâmetros: profundidade de água a jusante do açude (D), queda a transpor (H), ou seja o desnível entre a superfície livre da água a jusante e o topo da soleira do açude, e caudal (Q). As experiências foram realizadas num canal experimental existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa, utilizando um açude experimental formado por módulos de PVC, para possibilitar a manipulação da sua altura de acordo com as configurações a testar. Como resultados expectáveis considerou-se que: i) o comportamento de passagem (natação vs. salto) seria diferente de acordo com as combinações de profundidade de água a jusante e altura da queda a transpor; ii) configurações com quedas de água mais elevadas induziriam um comportamento de salto, enquanto que combinações com quedas mais baixas iriam promover a passagem por natação; e iii) o caudal iria influenciar o comportamento de passagem, prevendo-se que valores mais elevados de caudal iriam estimular uma mudança de comportamento de passagem por natação pela coluna de água para salto sobre o açude.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Instalações experimentais

O canal experimental existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa, consiste numa estrutura retangular de aço com dimensões 10,00 m x 1,00 m x 1,20 m, com paredes laterais em vidro temperado que permitem a observação direta dos movimentos dos peixes (Fig. 1). A entrada de água no canal, que circula em circuito fechado, ocorre por uma câmara localizada a montante da estrutura. A jusante existe um tanque que permite a manutenção da água que é recirculada bem como o controlo da altura de água no canal aquando dos ensaios experimentais, através de um sistema de válvulas. O declive do canal é ajustável, tendo sido posicionado com um declive de 3%, representativo do declive da maioria dos rios ibéricos.

Para avaliar a influência dos parâmetros D, H e Q no comportamento de passagem do barbo-comum ao transpor pequenos açudes de faces verticais, construiu-se um açude experimental, que abrange toda a largura do canal (1,00 m), formado por módulos de PVC para permitir a manipulação da sua altura de acordo com as configurações a testar (Fig. 1). O referido açude, que tem uma soleira de 20 cm de largura, foi instalado 2,75 m a montante da área de aclimação, criada na zona de jusante do canal por dois painéis de rede amovíveis para permitir a aclimação dos peixes às condições do canal experimental antes de cada ensaio. Imediatamente a jusante do açude foi estabelecida uma área de 0,65 m² (0,65 m x 1,00 m), denominada de área de aproximação, na qual os movimentos dos peixes foram monitorizados por observação direta e gravados por uma câmara (GoPro HERO3) posicionada por cima do açude.

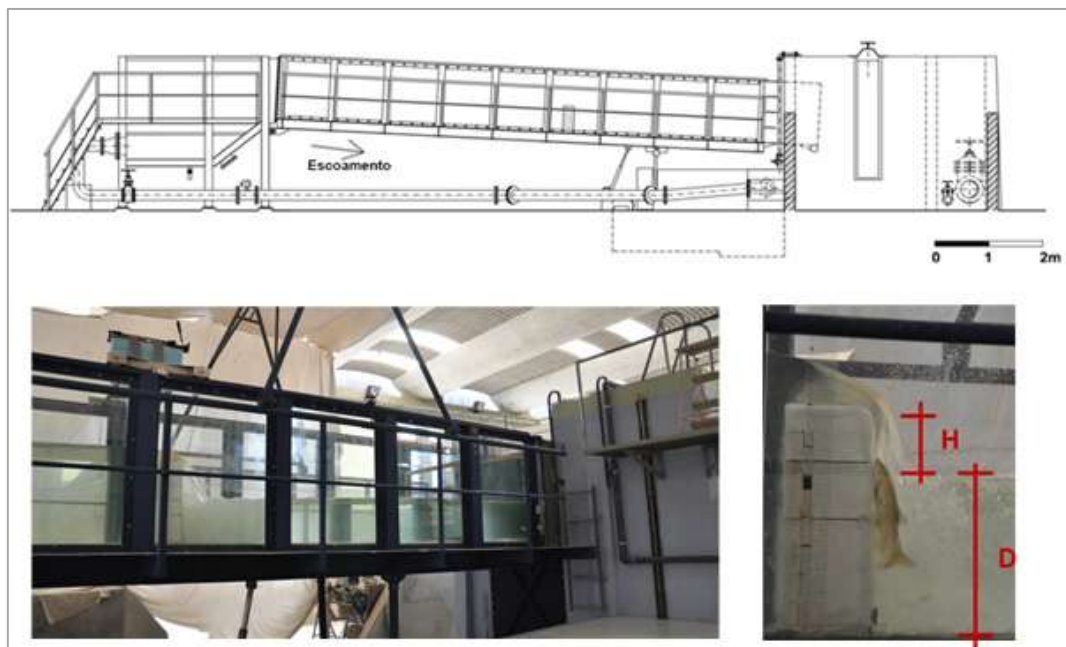


Figura 1. Canal experimental localizado no LNEC. Em cima, planta do canal com um declive de 3%.

Em baixo à esquerda, fotografia do canal experimental, com as suas paredes laterais de vidro temperado. Em baixo à direita, açude experimental de faces verticais usado nos ensaios, e ilustração dos parâmetros testados (D e H); nesta imagem está representada uma passagem por natação pela coluna de água que se forma na face de jusante do açude.

2.2. Ensaios biológicos

Os exemplares de barbo-comum utilizados nos ensaios (comprimento total médio de $18,7 \text{ cm} \pm 3,3 \text{ cm}$) foram capturados no rio Lisandro através de pesca elétrica (Hans Grassl IG-200), respeitando a metodologia estabelecida pelo Comité Europeu de Normalização (CEN, 2003). Ao todo, realizaram-se seis saídas para captura de peixes, recolhendo em cada saída 65 exemplares. Os peixes foram transportados para as instalações do LNEC e mantidos, por um período máximo de seis dias, em 3 tanques com capacidade de 700 l cada. Esses tanques de manutenção dispõem de um sistema de filtragem biológica (Fluval Canister Filter FX5) para recirculação da água e eliminação de eventuais substâncias tóxicas (p. ex. nitratos e nitritos).

Inicialmente, mantendo $Q = 50 \text{ l/s}$, foram testadas 16 configurações ($D \times H$) considerando a combinação dos valores de $D = 10, 20, 30$ e 50 cm , e de $H = 5, 10, 15$ e 25 cm (mais detalhes em Amaral et al., 2016). Posteriormente, selecionando a configuração $D \times H$ que apresentou maior sucesso de passagem, foram testados os caudais de 25, 75 e 100 l/s . Para cada configuração foram realizadas 4 réplicas, usando em cada réplica um cardume de 5 peixes ($n = 20$ peixes por configuração). Antes do início de cada ensaio, os peixes foram mantidos durante 15 minutos na área de aclimação. Após esse período, o painel de rede foi removido e os peixes puderam movimentar-se livremente ao longo do canal experimental durante um período máximo de 60 minutos. Tanto a passagem para montante como para

jusante foram permitidas, portanto, os peixes puderam transpor o açude várias vezes. Durante os ensaios foi registada a seguinte informação: número de tentativas de passagem (i.e., o número de peixes que tentaram ativamente transpor o açude dentro da área de aproximação), número de sucessos de passagem para montante, e tipo de comportamento de passagem (natação vs. salto). As gravações de vídeo foram igualmente analisadas para confirmar o tipo de comportamento de passagem registado em cada configuração (Fig. 2). Por último, as condições hidrodinâmicas presentes a jusante do açude, em algumas configurações chave, foram caracterizadas utilizando um 3D Acoustic Doppler Velocimeter (Vectrino ADV; Nortek AS).

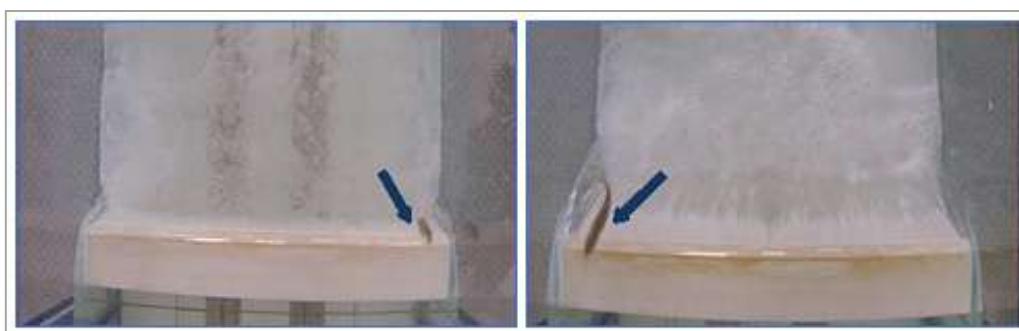


Figura 2. Imagens das gravações de vídeo (vista de topo) ilustrativas dos dois comportamentos de passagem do barbo-comum. À esquerda, passagem nadando pela coluna de água que se forma na face de jusante do açude. À direita, salto sobre o obstáculo.

2.3. Análise de dados

Para determinar se o tipo de comportamento de passagem (resposta) foi dependente das 16 configurações D×H testadas (tratamento), realizou-se o teste de Freeman-Halton (uma versão do teste exato de Fisher modificado por Freeman e Halton (1951), normalmente aplicado em comparações com tabelas superiores a 2x2), seguido de um teste *post hoc* para comparações por pares, usando o pacote *rcompanion* (Mangiafico, 2016) do programa R (R Core Team, 2016). Adicionalmente, a influência de D, H, e a interação de D e H, sobre o tipo de comportamento de passagem do barbo-comum, bem como sobre a mudança de comportamento da natação para o salto, foi determinada através da análise da variância por permutações (PerMANOVA), com base nas distâncias euclidianas, usando o pacote PERMANOVA presente no programa PRIMER +v6.0 (Anderson et al., 2008). Quanto ao parâmetro Q, utilizou-se o mesmo teste de Freeman-Halton para verificar a sua influência sobre o tipo de comportamento de passagem adotado pelo barbo-comum.

3. RESULTADOS

O barbo-comum transpôs as configurações testadas maioritariamente nadando pela coluna de água que se formou na face de jusante do açude experimental (Fig. 3). De um total de 277 passagens para montante, 224 (81%) foram conseguidas por natação, enquanto que

apenas 53 passagens (19%) foram alcançadas através de saltos sobre o açude. A configuração D20H10 registou o maior número de sucessos, contabilizando 50 passagens, das quais 45 (90%) foram através de natação pela coluna de água. As configurações D30H10 e D50H05 também se destacaram neste tipo de comportamento de passagem, com 26 (93%) e 24 (96%) sucessos por natação, respetivamente. Nas configurações D30H05 e D50H25, embora se tenha registado um menor número de transposições do açude (17 e 4 sucessos, respetivamente), todas as passagens foram feitas através da natação pela coluna de água. Quanto às transposições por salto, destacam-se as configurações D10H25 e D30H25, com 100% de passagens por salto (1 e 3 saltos, respetivamente), seguidas da configuração D20H25, com 95% relativos a 18 saltos com sucesso. No que diz respeito à influência de Q no comportamento de passagem para montante do barbo-comum na configuração D20H10 (Fig. 3), verificou-se que em todos os caudais testados, à exceção de Q = 100 l/s, ocorreram transposições por salto, variando entre 2 sucessos por salto (25%) para Q = 75 l/s, 4 (29%) para Q = 25 l/s, e 5 (10%) quando Q = 50 l/s. Em Q = 100 l/s ocorreu apenas uma passagem para montante, conseguida através da natação pela coluna

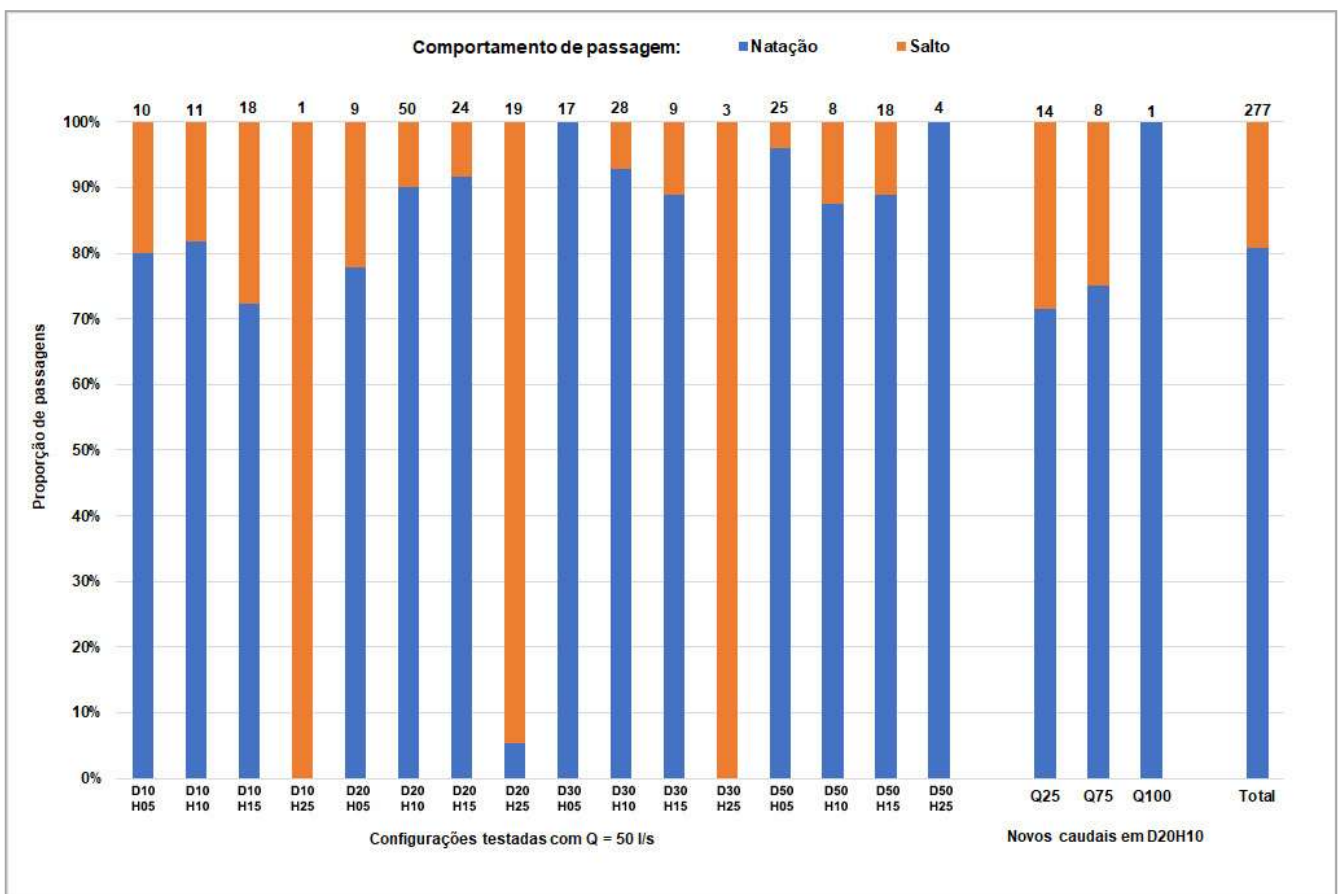


Figura 3. Proporção de passagens por natação e por salto nas configurações testadas. Na nomenclatura das configurações, D = profundidade de água a jusante do açude (cm), e H = altura da queda a transpor (cm). Sobre as barras apresenta-se o número total de passagens registadas em cada configuração.

de água.

Os resultados do teste de Freeman-Halton demonstraram que o tipo de comportamento de passagem para montante (natação vs. salto) adotado pelo barbo-comum foi significativamente dependente das 16 configurações D×H testadas ($p < 0,0001$). As configurações D10H25, D20H25 e D30H25 destacaram-se na comparação de pares ($p < 0,001$) por apresentarem maior proporção de transposições por salto sobre o açude. Quanto à análise da PerMANOVA, os resultados indicam que tanto D ($F = 3,02$; $p = 0,01$), como H ($F = 8,43$; $p = 0,001$), e a sua interação ($F = 3,52$; $p = 0,001$), estão significativamente correlacionados com o comportamento de transposição adotado pelo barbo-comum, destacando-se na comparação de pares D10 vs. D20, pela maior proporção de passagens por salto quando D = 10 cm, bem como as configurações com H = 25 cm, igualmente pela preponderância de passagens bem-sucedidas por salto (Tabela 1). Quanto ao parâmetro Q, os resultados do teste de Freeman-Halton indicaram que, para os caudais testados, não se verificou nenhuma influência deste parâmetro hidráulico ($p > 0,05$) no comportamento de passagem para montante.

Tabela 1. Resultados da comparação de pares, realizada depois do teste PerMANOVA, para os parâmetros D (profundidade de água a jusante do açude) e H (altura da queda a transpor), que influenciaram o comportamento de passagem (natação vs. salto) do barbo-comum ($\alpha = 0,05$).

Parâmetro	Comparação de pares	Resultado	
		t	P
D	D10 vs. D20	2,43	0,004
	D10 vs. D30	1,84	0,075
	D10 vs. D50	1,72	0,094
	D20 vs. D30	1,56	0,099
	D20 vs. D50	1,58	0,098
	D30 vs. D50	0,15	0,965
H	H05 vs. H10	1,79	0,092
	H05 vs. H15	0,40	0,779
	H05 vs. H25	3,94	0,001
	H10 vs. H15	1,41	0,157
	H10 vs. H25	4,30	0,001

H15 vs. H25

3,37

0,001

A caracterização das condições hidrodinâmicas a jusante do açude revelou diferenças entre as configurações testadas, que terão influenciado o tipo de comportamento de transposição optado. De acordo com os caudais testados, tanto a velocidade da água como a energia cinética turbulenta (TKE) foram registando um aumento ($0,2 \text{ m/s} < V_{xz} < 1,3 \text{ m/s}$; $0,06 \text{ m}^2/\text{s}^2 < \text{TKE} < 1,3 \text{ m}^2/\text{s}^2$) particularmente considerável para os caudais de 75 e 100 l/s, nos quais se verificaram, respetivamente, valores de velocidade e TKE superiores a 1 m/s e $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ perto da base do açude, bem como nas suas imediações no caso de $Q = 100 \text{ l/s}$ (mais detalhes em Amaral et al., 2016).

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou a importância da profundidade de água a jusante do açude, da queda a transpor, e do caudal, bem como o efeito das suas interações, no tipo de comportamento de passagem (natação vs. salto) do barbo-comum aquando da transposição de pequenos açudes de faces verticais. O elevado número de movimentos registados ao longo dos ensaios demonstraram que os peixes estavam estimulados a movimentar-se para montante e transpor o açude. No entanto, as condições hidrodinâmicas presentes em cada configuração testada desempenharam um papel importante no sucesso da passagem (Amaral et al., 2016), e especialmente, como patente neste estudo, no tipo de comportamento de passagem adotado pelo barbo-comum para transpor o açude.

Os resultados obtidos nestes ensaios demonstraram que o comportamento de passagem adotado pelo barbo-comum para transpor o açude experimental, nadando pela coluna de água ou saltando sobre o obstáculo, foi significativamente influenciado pelas combinações de profundidade de água a jusante do açude e alturas a transpor testadas, e consequentemente pela turbulência presente a jusante do açude. Como era expectável, a maioria das transposições registadas (81%) foram alcançadas através da natação pela coluna de água que se forma na face de jusante do açude. Como é mencionado por Baudoin et al. (2014), ao contrário do que se verifica nas espécies salmonícolas, embora as espécies ciprinícolas potamódromas sejam capazes de saltar, esse não é um comportamento comum devido às suas capacidades natatórias e de salto menos desenvolvidas (Katopodis e Gervais, 2016; Ovidio e Philippart, 2002). No entanto, como foi possível constatar, quando confrontadas com maiores obstáculos, ou turbulência mais elevada, estas espécies ciprinícolas podem alterar o seu comportamento de passagem para montante, aumentando as tentativas de transposição por salto e sendo bem-sucedidas, como nos 19% de transposições por salto registados neste estudo.

À exceção da configuração D50H25, o barbo-comum transpôs as configurações com $H = 25 \text{ cm}$ (i.e., D10H25, D20H25 e D30H25) saltando sobre o açude, representado cerca de 41,5%

do total dos saltos bem-sucedidos (22 saltos, num total de 53). Portanto, quedas de água maiores, que normalmente estão associadas a uma elevada dissipação de energia do escoamento e a turbulência a jusante do obstáculo (Baudoin et al., 2014; Powers e Orsborn, 1985; Towler et al., 2015), além de condicionarem o sucesso de transposição destas pequenas barreiras (Amaral et al., 2016), evidenciaram ser preponderantes na mudança de comportamento de passagem do barbo-comum, passando da transposição por natação para a transposição por salto. No caso da configuração D50H25, em que as 4 passagens para montante foram todas conseguidas através de natação, essa mudança de comportamento não se verificou pois a maior profundidade de água a jusante do obstáculo permitiu atenuar a dissipação de energia do escoamento (Baudoin et al., 2014; Powers e Orsborn, 1985; Towler et al., 2015), e consequentemente a turbulência, proporcionando condições para os peixes se aproximarem e tentarem transpor o açude por natação, sem que sentissem necessidade de adotar o salto para serem bem-sucedidos. Por outro lado, com profundidades de água menores, a turbulência gerada a jusante do açude influenciou tanto os sucessos de passagem para montante como o comportamento de transposição. Os resultados obtidos nas quatro configurações com $D = 10$ cm (D10H05, D10H10, D10H15 e D10H25) representaram aproximadamente 19% de todos os saltos bem-sucedidos (10 saltos, num total de 53), indicando que a profundidade de água não foi um fator limitante, e que o barbo-comum tentou adequar o seu comportamento de transposição às condições hidrodinâmicas presentes, de forma a ter sucesso (Mirzaei, 2017).

Relativamente ao parâmetro Q , estatisticamente não se verificou nenhuma evidência que o tipo de comportamento de passagem fosse influenciado pelo caudal testado (teste de Freeman-Halton, $p > 0,05$), embora fosse de esperar que, devido às elevadas velocidades e turbulência registadas a jusante do açude com o aumento de Q ($TKE > 1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e $V_{xz} > 1 \text{ m/s}$), o comportamento de passagem fosse condicionado e que as transposições bem-sucedidas ocorressem através de saltos. Mesmo assim, o barbo-comum tirou partido da queda de água mais angular e o maior volume da coluna de água (Powers e Orsborn, 1985) e transpôs estas configurações maioritariamente nadando, superando condições de velocidade e turbulência comparáveis às transpostas por algumas espécies salmonícolas de tamanho similar (Katopodis e Gervais, 2016).

Em conclusão, estes resultados demonstram que H é uma das características físicas mais importantes dos açudes de faces verticais que deve ser cuidadosamente considerada ao avaliar a permeabilidade destes obstáculos aos movimentos migratórios das espécies ciprinícolas potamódromas. Na prática, as observações resultantes deste estudo poderão ser úteis na definição de medidas de requalificação deste tipo de obstáculos, mais adequadas às capacidades e comportamentos de passagem de várias espécies, de forma a melhorar a livre movimentação dos peixes e aumentar a conectividade entre os diversos habitats.



AGRADECIMENTOS

Este estudo foi apoiado pelo projeto *MARS – Managing Aquatic Ecosystems and Water Resources Under Multiple Stress* (Contrato No. 603378). O Centro de Estudos Florestais (CEF) é financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) (UID/AGR/00239/2013). Susana Dias Amaral auferiu de uma bolsa da Universidade de Lisboa/Santander Totta (SantTotta/BD/RG2/SA/2011) e é atualmente financiada por uma bolsa de Doutoramento da FCT (SFRH/BD/110562/2015). Paulo Branco é financiado por uma bolsa de Pós-Doutoramento da FCT (SFRH/BPD/94686/2013). Os autores gostariam ainda de agradecer à equipa do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do LNEC por todo o apoio prestado durante os ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarts B.G., Van Den Brink F.W., Nienhuis, P.H. (2003). Habitat loss as the main cause of the slow recovery of fish faunas of regulated large rivers in Europe: the transversal floodplain gradient. *Regulated Rivers: Research and Management* 20, 3–23.
- Amaral S. D., Branco P., Silva A. T., Katopodis C., Viseu T., Ferreira M. T., Pinheiro A.N., Santos J.M. (2016). Upstream passage of potamodromous cyprinids over small weirs: the influence of key-hydraulic parameters. *Journal of Ecohydraulics* 1, 79–89.
- Anderson M. J., Gorley R.N., Clarke K. R. (2008). *PERMANOVA+ For PRIMER: guide to software and statistical methods*. Plymouth, UK: PRIMER-E.
- Baudoin J.M., Burgun V., Chanseau M., Larinier M., Ovidio M., Sremski W., Steinbach P., Voegtli B. (2014). *Assessing the passage of obstacles by fish. Concepts, design and application*. Onema, France.
- Branco P., Segurado P., Santos J.M., Pinheiro P., Ferreira M.T. (2012). Does longitudinal connectivity loss affect the distribution of freshwater fish?. *Ecological Engineering* 48, 70–78.
- Branco P., Amaral S. D., Ferreira M. T., Santos J. M. (2017). Do small barriers affect the movement of freshwater fish by increasing residency? *Science of the Total Environment* 581–582, 486–494.
- CEN (European Committee for Standardization). (2003). *Water quality: sampling of fish with electricity*. Brussels: CEN, European Standard EN 14011: 2003 E.
- Freeman G. H., Halton T. R. (1951). Note on exact treatment of contingency, goodness-of-fit and other problems of significance. *Biometrika* 38, 141–149.
- Katopodis, C., Gervais R. (2016). *Fish swimming performance database and analyses*. DFO Canadian Science Advisory Secretariat Research Document 2016/002. http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/Publications/ResDocs-DocRech/2016/2016_002-eng.html.



- Kondratieff M.C., Myrick C.A. (2006). How high can Brook Trout jump? A laboratory evaluation of Brook Trout jumping performance. *Transactions of the American Fisheries Society* 135, 361–370.
- Lucas M.C., Baras E. (2001). *Migration of Freshwater Fishes*. Blackwell Science, Australia.
- Mangiafico S. (2016). rcompanion: Functions to Support Extension Education Program Evaluation. R package version 1.1.3. <https://CRAN.R-project.org/package=rcompanion>.
- Mirzaei P.A. (2017). Development of a fish leaping framework for low-head barriers. *Journal of Hydro-environment Research* 14, 34–43.
- Nilsson C., Reidy C.A., Dynesius M., Revenga C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science* 308, 405–408.
- Ovidio M., Philippart J. C. (2002). The impact of small physical obstacles on upstream movements of six species of fish - synthesis of a 5-year telemetry study in the River Meuse basin. *Hydrobiologia* 483, 55–69.
- Ovidio M., Capra H., Philippart J.C. (2007). Field protocol for assessing small obstacles to migration of brown trout *Salmo trutta*, and European grayling *Thymallus thymallus*: a contribution to the management of free movement in rivers. *Fisheries Management and Ecology* 14, 41–50.
- Powers P. D., Orsborn J. F. (1985). *Analysis of Barriers to Upstream Fish Migration. An Investigation of the Physical and Biological Conditions Affecting Fish Passage Success at Culverts and Waterfalls*. US Department of Energy, Bonneville Power Administration, Division of Fish and Wildlife, Final Project Report Part 4 of 4 n DOE/BP-36523–1, Project No. 198201400.
- R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Santos J.M., Branco P., Katopodis C., Ferreira T. and Pinheiro A. (2014). Retrofitting pool-and-weir fishways to improve passage performance of benthic fishes: Effect of boulder density and fishway discharge. *Ecological Engineering* 73, 335–344.
- 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, 173–177.
- Towler B., Mulligan K., Haro A. (2015). Derivation and application of the energy dissipation factor in the design of fishways. *Ecological Engineering* 83, 208–217.