

COLOCAÇÃO DE SUBSTRATOS ARTIFICIAIS EM PASSAGENS PARA PEIXES DO TIPO BACIAS SUCESSIVAS: EFEITOS DA DENSIDADE E DO CAUDAL

José M. SANTOS ⁽¹⁾; Paulo BRANCO ⁽²⁾; Teresa VISEU ⁽³⁾; António PINHEIRO ⁽⁴⁾; Teresa FERREIRA ⁽⁵⁾

Resumo

A colocação de substratos artificiais em passagens para peixes do tipo bacias sucessivas, com o objetivo de facilitar a transposição da ictiofauna, é um assunto que tem merecido crescente atenção. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de uma passagem para peixes experimental de bacias sucessivas, com substratos colocados do fundo do dispositivo, sob diferentes caudais, para facilitar os movimentos para montante de barbo-comum (*Luciobarbus bocagei*), uma espécie bêntica presente em quase todas as bacias hidrográficas ibéricas. Apesar de não se terem detetado diferenças significativas no sucesso de passagem entre configurações apresentando diferentes densidades de substrato (densidade alta: 35%; densidade baixa: 40%), o caudal mais elevado originou uma maior proporção ($P < 0,05$) de passagens bem-sucedidas (50%), relativamente ao caudal menor (25%). Além disso, sob caudal mais elevado, o tempo de transposição através do dispositivo foi significativamente menor na situação de alta ($5,3 \pm 4,2$ min.), face à situação de baixa densidade ($12,1 \pm 6,5$ min.). Os resultados demonstraram que, embora o sucesso de passagem tenha sido independente da densidade de substrato, configurações de maior densidade em associação com caudal mais elevado podem ser vantajosas, uma vez que reduzem o tempo de transposição através da passagem para peixes.

Palavras-chave: ciprinídeos, eficiência, passagem para peixes convencional, substratos artificiais, tempo de transposição,

⁽¹⁾ Doutor em Engenharia Florestal, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, email: jmsantos@isa.ulisboa.pt, Tel. 213 653 489, Fax. 213 653 338

⁽²⁾ Doutor em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, email: pjbranco@isa.ulisboa.pt, Tel. 213 653 489, Fax. 213 653 338

⁽³⁾ Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, email: tviseu@lnec.pt, Tel. 218 443 771, Fax. 218 443 016

⁽⁴⁾ Professor Catedrático, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, email: antonio.pinheiro@tecnico.ulisboa.pt, Tel. 218 418 148, Fax. 218 499 242

⁽⁵⁾ Professora Catedrática, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 1349-017 Lisboa, email: terferreira@isa.utl.pt, Tel. 213 653 487, Fax. 213 653 338

1. INTRODUÇÃO

As passagens para peixes convencionais do tipo bacias sucessivas constituem o dispositivo de transposição para peixes mais comum em todo o mundo (Larinier, 2008; Pompeu *et al.*, 2012 ; Hatry *et al.*, 2013). Estes dispositivos encontram-se sobretudo instalados em açudes, consistindo essencialmente num canal retangular dividido por septos transversais, com aberturas, em lados alternados, no topo (descarregadores) e/ou no fundo (orifícios submersos), dividindo a altura total a ser transposta em várias quedas mais pequenas, formando uma série de bacias (Katopodis *et al.*, 2001). As bacias têm um duplo objetivo: por um lado oferecem áreas de descanso para os peixes, e por outro, asseguram uma adequada dissipação da energia da água. Apesar da sua popularidade, a eficiência destes dispositivos é relativamente baixa em muitas partes do mundo, nomeadamente nos países do sul da Europa (Santos *et al.*, 2012), uma vez que a sua conceção foi originalmente influenciada por diretrizes baseadas na ictiofauna salmonícola do norte da Europa, enquanto que ictiofauna Ibérica é composta sobretudo por espécies cipinícolas e outros taxa com menor capacidade natatória (Branco *et al.*, 2013a). A incorporação de substratos artificiais no canal destes dispositivos, que possam contribuir para a melhoria do respetivo desempenho para os movimentos das espécies cirpinícolas, constitui deste modo uma alternativa a considerar.

A colocação de substratos artificiais em passagens para peixes convencionais, por forma a torná-las mais atrativas para a passagem da ictiofauna para montante tem merecido grande atenção (Gough *et al.*, 2012). A adição de pedras ou blocos, que constituem uma componente intrínseca das passagens para peixes naturalizadas (Katopodis *et al.*, 2001), pode ser útil para auxiliar os movimentos piscícolas em passagens para peixes convencionais do tipo bacias sucessivas, desde que a capacidade de vazão destes dispositivos não fique comprometida (Stevenson e Baker, 2009). A colocação de blocos no fundo destes dispositivos tem sido aliás referida como uma ação importante para melhorar a passagem das espécies piscícolas para montante, uma vez que a presença de tais estruturas físicas no fundo do canal contribui para redução das velocidades, permitindo que as espécies de menor capacidade natatória possam obter vantagem destes refúgios de velocidade (FAO/DVWK, 2002). Apesar do seu potencial para auxiliar a passagem de peixes, poucos estudos existem atualmente que se foquem na colocação de substratos artificiais em passagem para peixes convencionais. No entanto, estudos hidráulicos anteriores, demonstraram que a colocação de substratos do tipo bloco em diferentes densidades, influenciou fortemente o comportamento do escoamento na vizinhança de tais estruturas, exercendo uma considerável influência nas condições hidráulicas adequadas para os movimentos das espécies piscícolas para montante (Shamloo *et al.*, 2001). Como tal, e com o intuito de melhorar a eficiência dos dispositivos de transposição, é necessário que sejam testados novos cenários de alterações que incorporem simultaneamente componentes de passagens convencionais e naturalizadas (Bunt *et al.*, 2012). Uma vez que a legislação atual enfatiza a necessidade de se providenciar passagem para todas as espécies de peixes, independentemente do seu valor comercial e recreativo, tais ações devem idealmente incidir em todas as espécies presentes numa determinada massa de água. Dado que uma abordagem deste tipo não seria viável do ponto de vista temporal e financeiro, uma opção válida será agrupar as espécies em grupos funcionais, com base em traços morfológicos e no tipo de nicho ecológico que as mesmas ocupam (Leonard e Orth, 1988).

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência de uma passagem para peixes experimental de bacias sucessivas com substratos artificiais do tipo bloco, com o intuito de facilitar os movimentos para montante de uma espécie potamódroma bêntica, o barbo-comum (*Luciobarbus bocagei*). Foi dada particular atenção aos efeitos da densidade de substrato e do caudal, no sucesso de passagem da espécie e respetivo tempo de transposição através do dispositivo. As seguintes questões foram levantadas: (a) será que o sucesso de passagem é dependente da densidade de substrato, do caudal ou de ambos? e (b) será que os peixes que conseguem transpor o dispositivo, demoram o mesmo tempo a fazê-lo independentemente da densidade de substrato?

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Passagem para peixes experimental

O estudo teve lugar na passagem para peixes de bacias sucessivas instalada no Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). A passagem consiste num modelo à escala real, constituído por um canal com estrutura em aço (10,00 m x 1,00 m x 1,20 m), dotado de paredes laterais de vidro acrílico, um tanque a montante (4 m²) para controlo do caudal e um outro a jusante (12 m²) destinado à aclimação dos peixes antes dos ensaios experimentais. A secção longitudinal do canal foi dividida em 6 bacias através de septos de polipropileno, cada um com um orifício de fundo, estando estes dispostos num padrão em zig-zag para se maximizar o desempenho de passagem (Silva *et al.*, 2012). Para minimizar o efeito da iluminação lateral no dispositivo, o que poderia afetar o comportamento dos peixes, foram instaladas telas de pano dispostas ao longo das paredes do canal. O declive do canal é de 8,5%, estando dentro dos limites referidos na bibliografia para este tipo de estruturas (Larinier, 2008).

2.2 Delineamento experimental hidráulico

Foram ensaiadas 4 configurações (Quadro 1) em função do caudal, Q (baixo, 38,5 l/s ou elevado, 62,7 l/s) (Silva *et al.*, 2011); e da densidade de substrato (baixa, 8 blocos/bacia ou elevada, 12 blocos/bacia) - colocado no fundo do canal. Os blocos são paralelepípedos, moldados em argamassa, com arestas laterais arredondadas (15 cm x 15 cm x 10 cm de altura), tendo sido posicionados ao longo de cinco linhas igualmente espaçadas em arranjos simétricos (Figura 1). Com o objetivo de minimizar a formação de zonas de elevada turbulência, foram dispostos de acordo com a orientação preferencial expetável para os vetores de velocidade, i.e. ao longo de uma diagonal entre os orifícios de entrada e de saída (Heimerl *et al.*, 2008).

Quadro 1. Descrição das quatro configurações baseadas em diferentes combinações de caudal (Q) e densidade de blocos (DB). d – profundidade média da água; A_o – área do orifício; h_{m1} – profundidade da água no plano 1; h_{m2} – profundidade da água no plano 2. É também mostrada a proporção de sucessos e o tempo de transposição.

Configuração	Q	DB	d (cm)	A_o (cm ²)	h_{m1} (cm)	h_{m2} (cm)	Proporção sucessos (%)	Tempo transp. (min.)
E1	Elevado	Elevada	84	529	5	21	50	5.3 ± 4.2
E2	Elevado	Baixa	84	529	5	21	50	12.1 ± 6.5
E3	Baixo	Elevada	88	324	5	21	20	9.6 ± 6.7
E4	Baixo	Baixa	88	324	5	21	30	9.4 ± 8.9

Uma vez que a eficiência de uma passagem para peixes depende das condições hidráulicas existentes no interior desta, da sua adequação à capacidade natatória e comportamento das espécies-alvo (Williams *et al.*, 2012), foram caracterizadas, para cada configuração, as condições atuais de velocidade da água. Para o efeito foram efetuadas medições de velocidade instantânea segundo diferentes eixos (x, y e z) em dois planos horizontais paralelos ao fundo do canal – a meia altura dos blocos (ou seja, a 5 cm de altura; plano 1) e a 25 % da profundidade média da bacia (ou seja a 11 -12 cm de altura acima dos blocos; plano 2). O espaçamento entre os pontos de medição variou em ambos os planos de medição: no plano acima dos blocos (plano 2) , o espaçamento foi mais apertado (5-8 cm na direção x- e y-) já que toda a área correspondente se encontrava disponível para medição. Já no plano a meia altura dos blocos (plano 1), a malha de medição foi mais larga (10-13 cm) em virtude da presença destas estruturas. Em qualquer dos casos, o espaçamento entre pontos foi menos espaçado na vizinhança dos orifícios de entrada e saída, locais onde as flutuações de velocidade são geralmente mais pronunciadas (Santos *et al.*, 2012). Ao todo, foi amostrada uma malha de 46-57 pontos no plano 1 e de 83-88 no plano 2, com recurso a um Vectrino Acústico Doppler Velocimeter (Nortek AS) orientado verticalmente para baixo e com uma frequência de 25 Hz para um período de 90 s. As medições foram efetuadas na segunda bacia a contar de jusante, que é representativa das condições hidráulicas da passagem, já que o escoamento tem características semelhantes em todas as bacias, à exceção das bacias das extremidades de montante e jusante. O desnível entre bacias é de 0,162 m.

2.3 Delineamento experimental biológico

Foram capturados exemplares de barbo-comum (*Luciobarbus bocagei*) no rio Sorraia recorrendo à metodologia de pesca elétrica (CEN, 2003), tendo-se empregue uma baixa voltagem (250 V) para minimizar o risco de eventuais lesões nos peixes. As capturas tiveram lugar entre abril e junho, que corresponde ao período de migração reprodutiva da espécie (Santos *et al.*, 2012), estando deste modo garantido o estado fisiológico ideal para que haja estímulo para os movimentos para montante. Para diminuir a risco de seleção de indivíduos com diferentes motivações, apenas os exemplares maduros foram selecionados.

Foram selecionados peixes adultos de comprimento semelhante média ± DP: 20,09 ± 0,98 cm de comprimento total), tendo seguidamente sido transportados (em água do rio e com recurso a oxigenadores portáteis) para as instalações do LNEC. Uma vez em laboratório, os peixes foram transferidos para tanques de 700 l, sob condições controladas de temperatura

da água (média \pm DP: 17,1 \pm 1,79 °C), pH (6,8) e oxigênio dissolvido (média \pm DP: 8,83 \pm 1,2 mg/l), por um período mínimo de 48 horas antes do início dos ensaios. A água foi mudada diariamente (150 l/dia), tendo a alimentação dos peixes (sticks de Tetra Pond) cessado 24h antes do início dos ensaios.

Com o objetivo de avaliar a eficiência de passagem dos peixes, em função do caudal e da densidade de blocos, foram realizados 20 ensaios para cada uma das 4 configurações (E1 a E4; Quadro 1), consistindo cada ensaio na monitorização dos movimentos para montante de um exemplar de barbo-comum ao longo do dispositivo. A eficiência de uma passagem para peixes consiste na proporção de indivíduos que uma vez a jusante da mesma, consegue transpor com sucesso o dispositivo com um mínimo de atraso (Bunt *et al.*, 2012). A proporção de transposições (i.e. movimentos com sucesso) e o tempo de passagem, constituem como tal os 2 parâmetros-chave intrinsecamente relacionados com a eficiência de uma passagem para peixes e que foram avaliados no presente estudo.

No início de cada ensaio, os painéis de rede entre o tanque de aclimatação e o canal foram removidos e a cada peixe foi dada a possibilidade de efetuar a subida do dispositivo de forma espontânea. Cada ensaio durou no máximo 90 minutos ou terminou quando cada indivíduo transpôs com sucesso o dispositivo. Os movimentos piscícolas foram monitorizados de forma contínua por dois observadores independentes, não tendo havido qualquer interação destes com os peixes. Foram igualmente utilizadas duas câmeras de vídeo (Sony DCR- HC23E) dispostas acima e lateralmente à estrutura para auxiliar as observações. Os parâmetros registados foram: i) o sucesso (ou fracasso) na transposição do dispositivo e ii) o tempo de passagem necessário à transposição.

2.4 Análise estatística de dados

Os dados de velocidade instantânea foram inicialmente filtrados usando os procedimentos de atenuação de valores extremos de Goring e Nikora (2002), modificados por Wahl (2003). Seguidamente as velocidades instantâneas V_x e V_y , medidas em cada ponto segundo a distância x - e y - respetivamente, foram usadas para calcular a resultante da componente horizontal da velocidade V_{xy} , de acordo com:

$$V_{xy} = (V_x^2 + V_y^2)^{1/2} \quad (1)$$

em que:

V_{xy} - resultante da componente horizontal da velocidade

V_x - velocidade instantânea na direção x -

V_y - velocidade instantânea na direção y -

Este parâmetro pode contudo não ser suficiente para explicar a ocorrência de fenómenos complexos no escoamento (Song e Chiew, 2001), nomeadamente quando são colocadas estruturas físicas, como blocos, no fundo do canal. Como tal, e para posterior relação com os movimentos piscícolas, foi igualmente utilizada a componente vertical da velocidade, V_z , na comparação entre diferentes configurações, tendo em conta que valores negativos representam velocidades descendentes e valores positivos, referem-se a velocidades ascendentes.

Após a obtenção da resultante horizontal da velocidade (V_{xy}) e da componente vertical (V_z), foram efetuados testes emparelhados entre pontos de medição correspondentes nas diferentes configurações, para averiguar a existência de diferenças significativas nos padrões de caudal. Os dados foram primeiramente analisados através do teste de Shapiro-

Wilk para testar eventuais desvios à normalidade das variáveis. Foram posteriormente efetuadas as seguintes comparações através de testes emparelhados de Wilcoxon:

- (i) E1 vs E2 (efeito da densidade ; Q fixo (elevado));
- (ii) E3 vs E4 (efeito da densidade; Q fixo (baixo));
- (iii) E1 vs E3 (efeito do caudal; densidade fixa (elevada))
- (iv) E2 vs E4 (efeito do caudal; densidade fixa (baixa))

Sempre que foi encontrado um efeito significativo ($P < 0,05$) nas diferentes variáveis entre cada par de configurações, foram desenhados mapas de correspondente distribuição espacial com o objetivo de visualizar os padrões hidráulicos e detetar fenómenos hidráulicos com evidência de afetação nos movimentos piscícolas.

Com o objetivo de testar a influência da densidade de blocos (elevada vs baixa), do caudal (elevado vs baixo) e de uma eventual interação entre estes dois fatores, foi efetuada um teste de PerMANOVA. Esta abordagem tem a vantagem sobre os métodos paramétricos tradicionais (ANOVA), de não requerer a distribuição normal dos dados, utilizando para o efeito sequências de permutações (Anderson e Robinson, 2001). Finalmente foram efetuados testes não-paramétricos de Mann-Whitney para testar a hipótese nula de que sob diferentes caudais, o tempo de transposição do dispositivo foi semelhante entre configurações de baixa e elevada densidade de blocos.

3. RESULTADOS

3.1 Ensaio hidráulicos

A comparação dos padrões de velocidade entre diferentes configurações de acordo com a densidade de blocos e o caudal na passagem para peixes produziu resultados semelhantes para os dois planos horizontais (Quadro 2), pelo que apenas são mostrados os mapas da resultante horizontal da velocidade (V_{xy}) para o plano 1.

Quadro 2. Resultados dos testes emparelhados de Wilcoxon, da comparação de diferenças entre configurações, com base na velocidade (V_{xy} – resultante da velocidade horizontal; V_z - componente vertical). Ver Quadro 1 para descrição das configurações

Plano	Configurações	Efeito testado; fator fixo	N	Velocidade			
				V_{xy}		V_z	
				Z	P	Z	P
1	E1 vs E2	DB; Q elevado	47	0.05	ns	2.68	<0.01
	E3 vs E4	DB; Q baixo	57	0.75	ns	1.18	ns
	E1 vs E3	Q; DB elevada	46	4.11	<0.001	0.23	ns
	E2 vs E4	Q; DB baixa	54	2.85	<0.01	1.36	ns
2	E1 vs E2	DB; Q elevado	88	1.03	ns	2.77	<0.01
	E3 vs E4	DB; Q baixo	83	1.27	ns	1.80	ns
	E1 vs E3	Q; DB elevada	83	6.98	<0.001	1.76	ns
	E2 vs E4	Q; DB baixa	83	7.07	<0.001	0.57	ns

Não foram encontradas diferenças significativas nos padrões de V_{xy} entre configurações com diferentes densidades de blocos (elevada e baixa), quer com caudal elevado (E1 vs E2) ou baixo (E3 vs E4) (testes emparelhados de Wilcoxon, $P > 0,05$). Foram no entanto

detetadas diferenças significativas quando se considerou o efeito do caudal escoado no dispositivo, ou seja, para uma dada densidade de blocos, os padrões de V_{xy} obtidos foram significativamente diferentes entre a situação de elevado e de baixo caudal (E1 vs E3 e E2 vs E4) (testes emparelhados de Wilcoxon, $P < 0,01$). Os mapas correspondentes de V_{xy} , evidenciando a magnitude e direção dos vetores de velocidade mostram estas diferenças (Figura 1): nas configurações com elevada densidade de blocos (E1 e E3), notou-se um gradiente de velocidade muito mais pronunciado nos orifícios de entrada e saída, sobretudo no primeiro, durante a ocorrência do caudal elevado (gama de velocidades: 0,19-1,77 m/s) (Figura 1a), relativamente à situação de caudal baixo (0,12-0,28 m/s) (Figura 1b). Na configuração de baixa densidade, caudal elevado (E2) (Figura 1c), foi notória a presença de um jato heterogêneo, que se estendeu ao longo da parede lateral em direção ao orifício de saída. Este jacto apresentou um elevado gradiente de velocidade (0,78-1,68 m/s), diminuindo desde a zona do orifício de entrada até ao septo oposto onde ocorre a saída. Inversamente, nas condições de caudal baixo foi detetada a presença de um jato homogêneo (0,73-1,01 m/s) (E4) (Figura 1d).

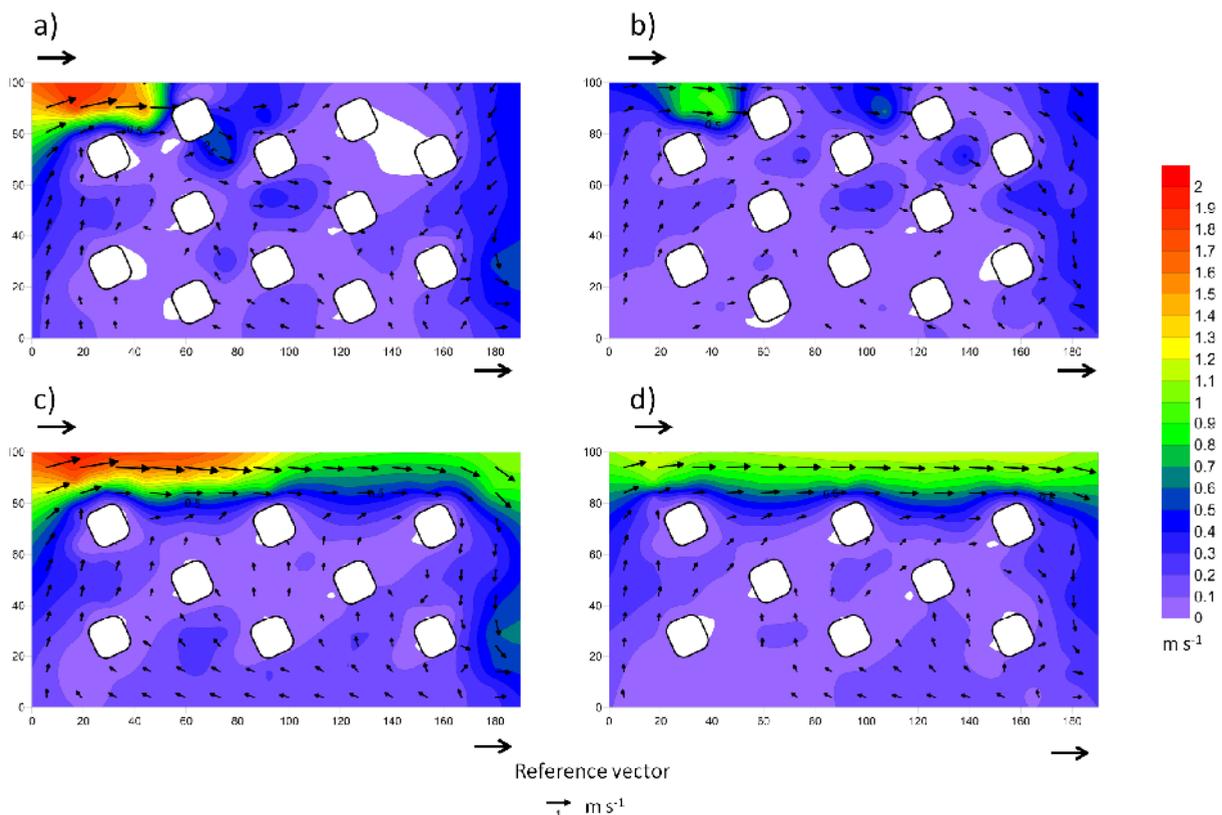


Figura 1. Resultante da velocidade horizontal (V_{xy} , magnitude e direção) nas bacias de acordo com as diferentes configurações no plano 1: a) E1; b) E3; c) E2 e d) E4. Setas fora do diagrama indicam a entrada (canto superior esquerdo) e saída (canto inferior direito) do caudal pelos orifícios

Ao contrário de V_{xy} , foram detetadas diferenças significativas na componente vertical da velocidade (V_z) entre configurações com diferentes densidade de blocos sob elevado caudal (testes emparelhados de Wilcoxon, $P < 0,01$) (Quadro 2, Figura 2). Com efeito, na presença de uma elevada densidade de blocos (E1) (Figura 2a), a proporção de velocidades

negativas (descendentes) foi significativamente menor (54,9%) em relação à configuração de baixa densidade (E2, 74,1%) ($\chi^2 = 3,64$; $p = 0,05$) (Figura 2b), ocorrendo principalmente na vizinhança dos septos de entrada e saída, em particular neste último.

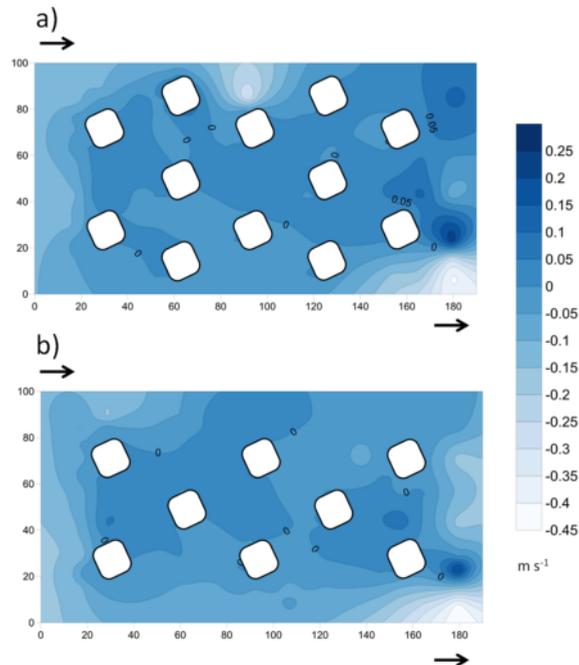


Figura 2. Isolinhas da velocidade vertical (V_z) nas bacias durante caudal elevado, em associação com a) elevada (E1) e b) baixa (E2) densidade de blocos no plano 1. Setas fora do diagrama indicam a entrada (canto superior esquerdo) e saída (canto inferior direito) do caudal pelos orifícios

3.2 Ensaio biológicos

A proporção de movimentos com sucesso foi maior (50%) nas configurações com caudal elevado no dispositivo (E1 e E2), independentemente da densidade de blocos (Quadro 1). Já nas configurações de caudal baixo (E3 e E4), a taxa de sucesso foi inferior a 30%. O tempo de transposição do dispositivo foi menor na configuração com caudal elevado e densidade de blocos (E1, média \pm DP: 5,3 \pm 4,2 min) e maior na configuração com caudal elevado e menor densidade de blocos (E2, média \pm DP: 12,1 \pm 6,5 min.).

O teste PerMANOVA evidenciou um efeito significativo do caudal no número de indivíduos que transpôs com sucesso o dispositivo (Quadro 3). Com efeito, o maior caudal conduziu a uma maior proporção ($P < 0,05$) de movimentos com sucesso (50%), relativamente ao caudal mais baixo (25%). Contrariamente, não foi detetado um efeito significativo da densidade de blocos no sucesso de transposição (elevada densidade: 35%; baixa densidade: 40%), nem uma possível interação entre os dois fatores. No entanto, quando se considera o tempo de transposição do dispositivo, verificou-se que sob condições de caudal mais elevado, os peixes demoraram significativamente menos tempo para a respetiva ascensão na situação de elevada densidade de blocos (5,3 \pm 4,2 min), relativamente ao cenário de baixa densidade destes (12,1 \pm 6,5 min.) ($P < 0,05$, teste de Mann-Whitney).

Quadro 3. Resultados do teste PerMANOVA, evidenciando os efeitos do caudal (Q) e da densidade de blocos (DB), no número de movimentos piscícolas com sucesso. ns – não significativo para um $\alpha=0,05$

Fator	d.f	SS	MS	F	P
DB	1	0.10	0.10	0.19	ns
Q	1	2.50	2.50	4.79	<0.05
DB * Q	1	0.10	0.10	0.19	ns
Resíduos	36	18.80	0.52		

4. DISCUSSÃO

A literatura tem revelado um crescente interesse na colocação de substratos (sobretudo blocos e pedras) no fundo de passagens para peixes, com o intuito de facilitar os movimentos piscícolas para montante. Este interesse tem sido essencialmente direcionado para as passagens convencionais do tipo bacias sucessivas e fendas verticais, havendo já alguns casos de estudo reportados na Europa (FAO/DVWK, 2002), América do Norte (Bestgen *et al.*, 2010), Austrália (Baker e Boubee, 2006), e até mais recentemente na China (Li *et al.*, 2013). O papel-chave dos substratos consiste na indução de uma dissipação de energia e de distribuição de velocidades mais heterogénea. Desta forma, os refúgios de velocidade criados pela colocação de substrato podem potenciar uma transposição mais fácil por espécies bênticas ou outras de menor dimensão, ao permitir que estas explorem estas zonas de maior heterogeneidade de velocidades (Branco *et al.*, 2013b). Assim, o presente trabalho não se destina a comparar o desempenho do dispositivo de transposição entre situações de fundo liso (sem substrato) e rugoso (com substrato), mas ao invés, a avaliar como é que opções de colocação de substrato em diferentes densidades e sob diferentes caudais em condições controladas de laboratório, se relacionam com o taxa de sucesso e tempo de transposição de uma espécie bêntica como o barbo-comum. Tais condições permitiram mais facilmente a manipulação de variáveis-alvo, controlando simultaneamente o ruído causado por fatores indesejáveis suscetíveis de enviesar os resultados (Kemp *et al.*, 2006).

A proporção de sucessos e o tempo de transposição do dispositivo constituíram as duas métricas utilizadas para avaliação da eficiência de passagem em resposta ao caudal e densidade de blocos. Relativamente ao caudal, os resultados do sucesso de transposição tiveram correspondência com as alterações detetadas nos padrões hidráulicos. Com efeito, para o caudal mais elevado registaram-se alterações significativas nos padrões de velocidade, tendo estas alterações sido acompanhada por um aumento na proporção de sucessos, que aumentou de 25% para 50%. Numa recente revisão bibliográfica à escala mundial e que envolveu 65 trabalhos (período 1960-2011), abordando estimativas de eficiência de passagens para peixes, Noonan *et al.* (2012) referiram que o valor médio deste parâmetro em passagens para peixes convencionais do tipo bacias sucessivas (sem substrato embutido) foi cerca de 40% para espécies não-salmonícolas. Como tal, o presente resultado constitui deste modo, uma melhoria no contexto da eficiência de passagem neste tipo de dispositivos. O aumento significativo no sucesso de transposição terá sido possivelmente devido ao gradiente de velocidade mais pronunciado nos orifícios de entrada e saída durante os ensaios com maior caudal. O caudal, e em particular a velocidade da

água, constitui o parâmetro-chave nos movimentos das espécies piscícolas para montante, em que estas tendem a procurar zonas com maior gradiente de velocidade nas suas rotas de migração (Williams *et al.*, 2012). Como tal, acredita-se que as alterações nas condições hidráulicas, refletidas principalmente na presença de maiores intensidades de velocidade, proporcionaram uma maior atração para os movimentos piscícolas. Há contudo que salientar uma possível influência de outros fatores não considerados (turbulência, ruído, temperatura) (Kemp *et al.*, 2011) e que podem igualmente ter influenciado o desempenho dos movimentos piscícolas para montante.

O tamanho do substrato constitui também um fator importante que pode ter influenciado a proporção de movimentos com sucesso na passagem para peixes. Os substratos de maiores dimensões e irregulares têm geralmente maior preferência pelos peixes do que os substratos pequenos e de baixa rugosidade, uma vez que permitem uma maior redução da velocidade da água e, conseqüentemente uma maior heterogeneidade hidráulica a nível do caudal e que os peixes podem explorar ao longo dos respetivos movimentos para montante (Santos *et al.*, 2013). No entanto, tais substratos não devem ser demasiado grandes a ponto de interferir com o comportamento migratório dos peixes. Por exemplo, Kynard *et al.* (2009) constataram que o cascalho de maiores dimensões diminuiu a intensidade da migração de esturjão branco, um resultado que pode estar relacionado com o facto de aqueles exemplares despendem mais tempo em atividade de alimentação nos locais de baixa velocidade, criados pela colocação do referido substrato. Noutro estudo mais recente com o objetivo de investigar o desempenho de movimentos piscícolas numa instalação laboratorial com substrato natural, Monk e Hotchkiss (2012) constataram que a dimensão do substrato deve ser da mesma ordem de grandeza que o comprimento dos peixes. Resultados semelhantes foram reportados por Stevenson e Baker (2009), que enfatizaram a necessidade do espaçamento entre substratos não dever ser inferior ao comprimento dos peixes. O presente trabalho utilizou substrato de dimensão próxima da dos peixes (cerca de 20 cm de comprimento total), e com espaçamentos superiores à dimensão média dos exemplares ensaiados; como tal, o atual dimensionamento da colocação de substrato no dispositivo, incluindo a respetiva orientação, terá seguramente permitido a existência de condições aceitáveis para os movimentos piscícolas para montante. Futuros trabalhos devem ser focados no comportamento de migração dos peixes quando confrontados com a presença conjunta de vários tipos de substratos (cascalho, pedras e blocos), colocados com diferentes espaçamentos, de modo a perceber a forma como a presença de micro-canais de baixa velocidade pode aumentar o sucesso de transposição.

Para além da proporção de movimentos com sucesso, que conforme se constatou, se encontrou relacionada com alterações do caudal, o trabalho focou-se igualmente no tempo de transposição do dispositivo pelos peixes, que constitui o outro indicador subjacente ao conceito de eficiência de uma passagem para peixes. Os resultados revelaram que, em contraste com as proporções de movimentos com sucesso, o tempo de transposição do dispositivo se encontrou relacionado com a densidade de blocos na presença de maior caudal; ou seja, nestas condições, os peixes demoraram significativamente menos tempo a transpor o dispositivo na situação de elevada densidade de blocos, relativamente à situação de baixa densidade. Estes resultados estão de acordo com os estudos hidráulicos anteriores que demonstraram que espaçamentos mais densos podem proporcionar condições hidráulicas mais adequadas para o movimento piscícola entre os substratos, em resultado de uma maior heterogeneidade hidráulica (Acharya *et al.*, 2001). A maior proporção de velocidades verticais ascendentes em resultado de um espaçamento mais apertado dos

blocos terá contribuído para uma maior heterogeneidade espacial, isto é, de zonas onde a direção dos vetores de velocidade são diferentes da do escoamento principal, facto que pode ter facilitado os movimentos piscícolas. A presença de velocidades verticais ascendentes altera as condições hidráulicas junto ao fundo do dispositivo, como resposta à colocação de estruturas físicas de pequena escala (Daraio *et al.*, 2012). Os padrões hidráulicos resultantes originam padrões de escoamento complexos, causando distorção no campo de velocidades, que normalmente resulta na formação de gradientes de velocidade nítidos, como os observados durante as condições de caudal mais elevado, podendo ter sido explorados pelas espécies durante os respetivos movimentos. Por outro lado, outros autores relataram que a velocidade ascendente pode perturbar o comportamento dos peixes, ao provocar uma corrente secundária que força os mesmos a deslocarem-se de uma altura na massa de água para outra, e como tal, induzindo reações internas que para fazer face à correspondente diferença de pressão hidrostática, podem causar diminuição do desempenho ao nível do tempo de transposição (Pavlov *et al.*, 2002). Torna-se assim claro que são necessários estudos futuros para esclarecer esta assunto, nomeadamente através da análise de outros fenómenos hidráulicos mais complexos, como a estrutura de remoinhos e vórtices na massa de água, utilizando técnicas mais avançadas (como por exemplo, a velocimetria por análise de partículas), que permitam uma visualização mais detalhada da interacção entre o caudal e o substrato.

Os resultados deste trabalho mostraram que o sucesso de transposição do dispositivo se revelou independente da densidade de substrato, se bem que a combinação de uma densidade mais elevada sob maior caudal na passagem para peixes, se revelou benéfica uma vez que reduziu o tempo necessário para a transposição. Tal resultado pode ter implicações ao nível da melhoria deste tipo de dispositivos, sobretudo dos que apresentem maior extensão em comprimento, já que é nestes onde os gastos energéticos dos peixes serão expetavelmente maiores e como tal, onde estes se encontram mais propensos a fadiga (Noonan *et al.*, 2012). Ao invés, se o valor do caudal for um fator limitante, deve ser utilizada uma baixa densidade de blocos, já que nestas condições a taxa de sucesso foi superior. Deve ser contudo mencionado, que a colocação de substrato no fundo das bacias pode tornar estes dispositivos mais suscetíveis ao entupimento por detritos, ramos ou outro material flutuante, podendo causar atrasos nos movimentos piscícolas para montante. Tal facto deve, como tal, ser do conhecimento de técnicos responsáveis pela conceção destes dispositivos. Finalmente importa referir que os resultados obtidos no presente trabalho foram baseados na utilização de substrato do tipo blocos paralelepípedos regulares, com o intuito de simplificar os processos de dimensionamento de passagens por bacias sucessivas, quando é necessária a transposição por espécies bênticas. A sua aplicação deve assim restringir-se a peixes de dimensão média que pertencem à mesma guilda funcional dos exemplares testados. Nestas condições, as conclusões deste estudo poderão ser amplamente aplicáveis, sendo desejável contudo que estudos futuros tenham a possibilidade de confrontar estes resultados com os obtidos para outros grupos funcionais (e.g., espécies de coluna de água ou de superfície).

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Terêncio Junior, Lafayette Luz, Ana Ferreira e Fernando Pereira, pela ajuda disponibilizada durante os ensaios hidráulicos e biológicos. O trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através do projeto

FishMove (PTDC/AGR-CFL/117761/2010). Durante este período, Paulo Branco beneficiou de uma bolsa de doutoramento (SFRH/BD/44938/2008) concedida pela FCT. O Instituto de Conservação da Natureza e das Florestal (ICNF) concedeu as necessárias credenciais de pesca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acharya M., Kells J.A., Katopodis C. (2001). Hydraulics of micro-channels in nature-like fishways. In *Proceedings of the 15th Hydrotechnical Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Victoria, BC, Canada, May 30-June 2, 2001. 8 p.
- Anderson M.J., Robinson J. (2001). Permutation tests for linear models. *Australian and New Zealand Journal of Statistics* 43, 75–88.
- Baker C.F., Boubée J.A. (2006). Upstream passage of inanga *Galaxias maculatus* and redfin bullies *Gobiomorphus huttoni* over artificial ramps. *Journal of Fish Biology* 69, 668 – 681.
- Bestgen K.R., Mefford B., Bundy J.M., Walford C.D., Compton R.I. (2010). Swimming performance and fishway model passage success of Rio Grande silvery minnow. *Transactions of the American Fisheries Society* 139, 433-448.
- Branco P., Boavida I., Santos J.M., Pinheiro A., Ferreira M.T. (2013b). Boulders as building blocks: improving habitat and river connectivity for stream fish. *Ecohydrology* 6, 627–634.
- Branco P., Santos J.M., Katopodis C., Pinheiro A., Ferreira M.T. (2013a). Pool-type fishways: two different morpho-ecological cyprinid species facing plunging and streaming flows. *PLoS One* 8: e65089.
- Bunt C.M., Castro-Santos T., Haro A. (2012). Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration. *River Research and Applications* 28, 457-478.
- CEN (2003). *Water quality: sampling of fish with electricity*. CEN, European Standard EN 14011. European Committee for Standardization, Brussels.
- Daraio J.A., Weber L.J., Zigler S.J., Newton T.J., Nestler J.M. (2012). Simulated effects of host fish distribution on juvenile unionid mussel dispersal in a large river. *River Research and Applications* 28, 594–608.
- FAO/DVWK. (2002). *Fish Passes - Design, Dimensions and Monitoring*. FAO, Rome.
- Goring D.G., Nikora V.I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering* 128, 117-126.
- Gough P., Philipsen P., Schollema P.P., Wanningen H. (2012). *From Sea to Source: International Guidance for the Restoration of Fish Migration Highways*. Regional Water Authority Hunze en Aa's, Postbus, The Netherlands.
- Hatry C., Binder T.R., Thiem J.D., Hasler C.T., Smokorowski K.E., Clarke K.D., Katopodis C., Cooke S.J. (2013). The status of fishways in Canada: trends identified using the national CanFishPass database. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 23, 271-281.
- Heimerl S., Krueger F., Wurster H. (2008). Dimensioning of fish passage structures with perturbation boulders. *Hydrobiologia* 609, 197-204.

- Katopodis C., Kells J.A., Acharya M. (2001). Nature-like and conventional fishways: alternative concepts? *Canadian Water Resources Journal* 26, 211-232.
- Kemp P.S., Gessel M.H., Sandford B.P., Williams J.G. (2006). The behaviour of Pacific salmonid smolts during passage over two experimental weirs under light and dark conditions. *River Research and Applications* 22, 429-440.
- Kemp P.S., Russon I.J., Vowles A.S., Lucas M.C. (2011). The influence of discharge and temperature on the ability of upstream migrant adult river lamprey (*Lampetra fluviatilis*) to pass experimental overshot and undershot weirs. *River Research and Applications* 27, 488-498.
- Kynard B., Parker E., Kynard B.E., Parker T. (2009). Behavior and habitat of young Kootenai River white sturgeon. Final Rept. Kootenai Tribe of Idaho, Bonners Ferry, pp. 31.
- Larinier M. (2008). Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia* 609, 97-108.
- Leonard P.M., Orth D.J. (1988). Use of habitat guilds of fishes to determine instream flow requirements. *North American Journal of Fisheries Management* 8, 399-409.
- Li Y.H., Kynard B., Wei Q.W., Zhang H., Du H., Li Q.K. (2013). Effects of substrate and water velocity on migration by early-life stages of kaluga, *Huso dauricus* (Georgi, 1775): an artificial stream study. *Journal of Applied Ichthyology* 29, 713–720.
- Lupandin A.I. (2005). Effect of flow turbulence on swimming speed of fish. *Biology Bulletin* 32, 461–466.
- Monk S.K., Hotchkiss R.H. (2012). Culvert roughness elements for native Utah fish passage: phase II. Report No. UT-12.09. Utah Department of Transportation Research and Development Division.
- Noonan M.J., Grant J.W.A., Jackson C.D. (2012). A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries* 13, 450–464.
- Pavlov D.S., Lupandin A.I., Kostin V.V. (2002). Causes and mechanisms of fish downstream migration from reservoirs with a slow water exchange. In *Downstream Migration of Fish Through Dams of Hydroelectric Power Plants*. Ed: G.F. Cada. Trans. T. Albert, trans. ORNL/TR-02/02. Oak Ridge Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Pompeu P.S., Agostinho A.A., Pelicice F.M. (2012). Existing and future challenges: the concept of successful fish passage in south America. *River Research and Applications* 28, 504-512.
- Santos J.M., Branco P.J., Silva A.T., Katopodis C., Pinheiro A.N., Viseu T., Ferreira M.T. (2013). Effect of two flow regimes on the upstream movements of the Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*) in an experimental pool-type fishway. *Journal of Applied Ichthyology* 29, 425-430.
- Santos J.M., Silva A.T., Katopodis C., Pinheiro P.J., Pinheiro A.N., Bochechas J., Ferreira M.T. (2012) Ecohydraulics of pool-type fishways: getting past the barriers. *Ecological Engineering* 48, 38-50.
- Shamloo H., Rajaratnam N., Katopodis C. (2001). Hydraulics of simple habitat structures. *Journal of Hydraulic Research* 39, 351-366.

Silva A.T., Santos J.M., Ferreira M.T., Pinheiro A.N., Katopodis C. (2011). 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, 360-373.

Silva A.T., Santos J.M., Ferreira M.T., Pinheiro A.N., Katopodis C. (2012). Passage efficiency of offset and straight orifices for upstream movements of Iberian barbel in a pool-type fishway. *River Research and Applications* 28, 529–542.

Song T., Chiew Y. (2001). Turbulence measurement in nonuniform open-channel flow using acoustic doppler velocimeter (ADV). *Journal of Engineering Mechanics* 127, 219–231.

Stevenson C., Baker C. (2009). *Fish passage in the Auckland region – a synthesis of current research*. Auckland Regional Council Technical Report 2009/084. Prepared by NIWA for Auckland Regional Council. National Institute of Water & Atmospheric Research: Hamilton.

Wahl T.L. (2003). Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data”. *Journal of Hydraulic Engineering* 129, 484–487.

Williams J.G., Armstrong G., Katopodis C., Larinier M., Travade F. (2012). Thinking like a fish: a key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions. *River Research and Applications* 28: 407-417.