



7, 8 e 9  
Março 2018  
ÉVORA  
Évora Hotel

GESTÃO DOS  
RECURSOS HÍDRICOS:  
NOVOS  
DESAFIOS

# ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM FRONTEIRAS POVOADAS POR HASTES RIGIDAS E EMERGENTES COM DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL VARIÁVEL

Ana Margarida RICARDO<sup>1</sup>; Rui M.L. FERREIRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Investigador Post-Doc, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, ana.ricardo@tecnico.ulisboa.pt

<sup>2</sup> Professor Associado, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, ruimferreira@tecnico.ulisboa.pt

## Resumo

Frequentemente vegetação emergente em zonas ripícolas apresenta uma distribuição espacial não uniforme. Neste trabalho a não uniformidade espacial é simulada no laboratório, variando longitudinalmente a densidade de hastes. Médias espaço-temporais das variáveis do escoamento são calculadas a partir de mapas de velocidade instantânea obtidos com a técnica *Particle Image Velocimetry* (PIV). Os resultados mostram que as tensões de Reynolds são completamente determinadas pela densidade de hastes local, não sendo sensíveis aos gradientes espaciais da densidade de hastes. Estas tensões parecem ajustar-se localmente às variações espaciais da distribuição de hastes. No entanto a distribuição espacial do escoamento médio é influenciada não só pelo valor local da densidade de hastes, como também pelos seus gradientes espaciais. As tensões dispersivas expressam essa influência, revelando uma subsistência da complexidade do escoamento gerada pela distribuição de hastes a montante, como uma forma de memória espacial. Assim, o efeito dos gradientes espaciais da densidade de hastes conduz sempre ao aumento das tensões dispersivas, embora a diferentes taxas, dependendo do sinal do gradiente.

**Palavras-chave:** Vegetação rígida, variabilidade espacial, PIV, tensões dispersivas, tensões de Reynolds.

**Tema:** 3 - Hidrologia, hidráulica fluvial e obras hidráulicas.

## 1. INTRODUÇÃO

A vegetação emergente, com uma ampla gama de espécies e com diferentes funções ecológicas, está presente em praticamente todos os sistemas costeiros e ribeirinhos. A vegetação desempenha um papel importante nos processos geomorfológicos, no transporte de sedimentos, nutrientes e contaminantes, na biodiversidade, na qualidade da água e na integridade da paisagem (Nepf, 2012; Yan *et al*, 2017). A existência de vegetação em cursos de água também está associada a maior resistência ao escoamento e, portanto, maior risco de inundação (Kadlec, 1990).

Têm-se registado progressos na caracterização tridimensional de escoamentos em zonas povoadas com vegetação emersa com base num procedimento de média no tempo e no espaço, designado por metodologia de média dupla espaço-temporal (DAM; Double-Average Methodology na literatura inglesa). A metodologia DAM permitiu avanços na compreensão dos fenómenos associados à resistência dos escoamentos em zonas com vegetação tendo em consideração a variabilidade do escoamento à escala do espaçamento médio entre hastes (Nikora *et al*, 2007; Tanino e Nepf, 2008; Ferreira *et al*, 2009). Variáveis de particular importância são as tensões de Reynolds médias no espaço e as tensões dispersivas, que dependem da densidade de hastes (Ferreira *et al*, 2009).

O escoamento por entre hastes rígidas não é homogéneo, sendo determinado principalmente pela interação entre vórtices libertados individualmente em cada haste. A geração de estruturas turbulentas é semelhante à de uma haste isolada, isto é, a produção de turbulência é dominada por estruturas características de esteiras. A interação dos vórtices de esteira com a turbulência de fundo depende do valor da escala de comprimento que caracteriza o espaçamento médio entre hastes (Ricardo *et al*, 2014).

As zonas com vegetação são frequentemente compostas por trechos de diferentes características (Schoelynck *et al*, 2012; Meire *et al*, 2014), em geral, apresentando variabilidade espacial na densidade de hastes (número de hastes por unidade de área). Esta característica levanta uma questão que pode ser expressa, de forma coloquial, como a memória espacial do escoamento: será o escoamento, à escala do espaçamento médio entre hastes, unicamente dependente da densidade de hastes local e do diâmetro das hastes (juntamente com as propriedades do fluido e velocidade média do escoamento), ou será também dependente da forma como as hastes estão distribuídas a montante? Isto é, estará o gradiente espacial da densidade das hastes associado a uma escala de comprimento relevante que não o diâmetro das hastes ou a distância média entre hastes local?

O presente trabalho aborda esta questão e visa discutir a influência da variação longitudinal da densidade de hastes na distribuição espacial das variáveis em escoamentos turbulentos à escala do espaçamento médio entre hastes. A metodologia passa pela quantificação das médias duplas espaço-temporais das velocidades, tensões de Reynolds e das tensões dispersivas (ou de forma) com base em ensaios laboratoriais utilizando distribuições aleatórias de cilindros rígidos e emergentes com densidades de hastes constantes e variáveis. A densidade de hastes,  $m$ , é definida como a média espacial local do número de hastes por unidade de área em planta e é expressa em hastes/m<sup>2</sup>. Uma zona povoada com hastes é, frequentemente, caracterizada pelo diâmetro das hastes,  $d$ , e pela fracção volumétrica de sólidos,  $\phi = \pi m d^2 / 4$ . Neste estudo, uma das configurações experimentais apresenta uma distribuição periódica de  $m$  com valores mínimos e máximos de 400 e 1600

hastes/m<sup>2</sup>. A outra configuração consiste numa distribuição uniforme das hastes com a densidade média do teste com  $m$  variável, correspondendo a  $m = 980$  hastes/m<sup>2</sup>.

Cilindros rígidos, emergentes e ligeiramente rugosos foram distribuídos de forma aleatória, com o objetivo de imitar hastes naturais num compromisso entre viabilidade laboratorial e semelhança física. Os parâmetros escolhidos para os testes laboratoriais procuraram corresponder os valores encontrados na natureza, em trechos de juncos rígidos ou pequenas árvores em ambientes ribeirinhos, que são caracterizados por conjuntos densos de hastes relativamente rígidas onde  $\phi$  pode ter valores até 0,45 (Nepf, 2012).

Este trabalho está organizado em cinco secções principais. Depois da introdução, o sistema físico e as implicações metodológicas são apresentadas. As instalações laboratoriais e a instrumentação são descritas de seguida e depois os resultados são apresentados. O documento termina com um resumo das principais conclusões.

## 2. SISTEMA FÍSICO E METODOLOGIA

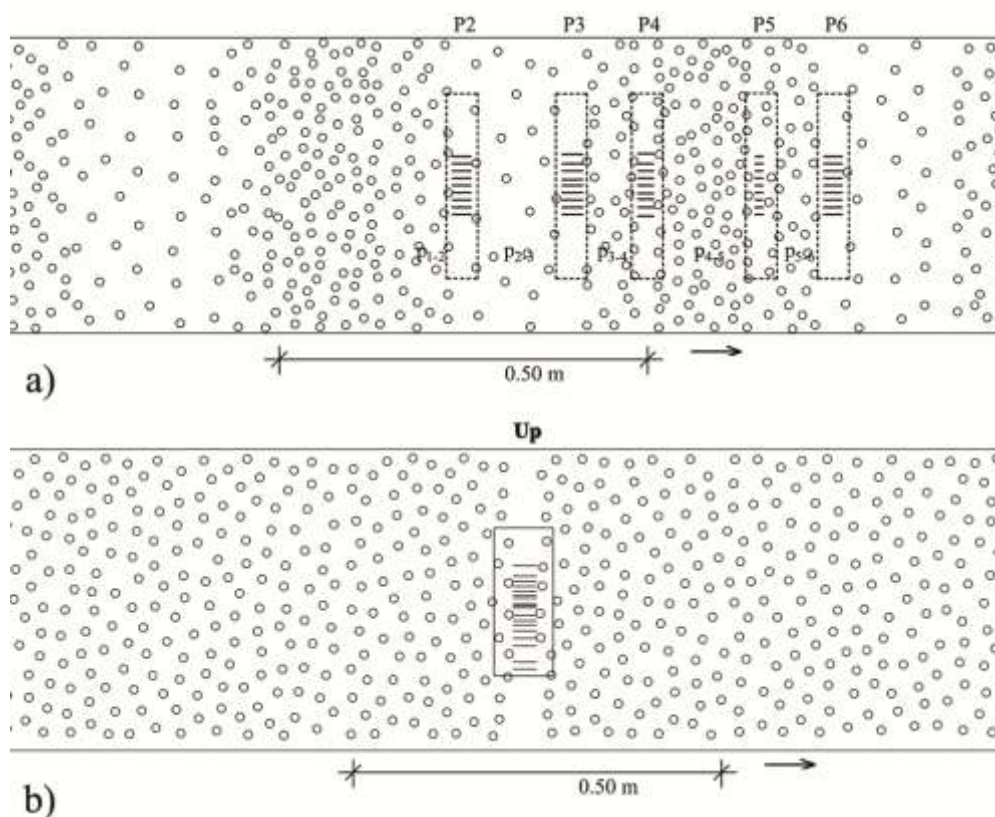
Os sistemas naturais não são homogéneos, estando muitas vezes dispostos alternadamente em trechos com vegetação dispersa e trechos com grande densidade de plantas (Schoelynck et al., 2012). Assim, o escoamento é potencialmente influenciado por várias escalas espaciais, incluindo o diâmetro das hastes e escalas maiores determinadas pelo espaçamento médio entre hastes e seus gradientes espaciais. Com o objetivo de identificar diferenças entre os escoamentos em zonas com densidade constante e variável da densidade de hastes,  $m$ , foram preparadas duas configurações experimentais: A com  $m$  variável e B com  $m$  constante. O número de hastes é o mesmo em ambos os casos.

A Figura 1 mostra uma representação em planta da distribuição das hastes. Na configuração A, a distribuição periódica de  $m$  é composta por sete comprimentos de onda ao longo de um troço com 3.5 m de comprimento e apresenta uma densidade de hastes global de 980 hastes/m<sup>2</sup>. Cada comprimento de onda tem 0.5 m de comprimento e é constituído por:

- um troço com 15 cm de comprimento com  $m = 1600$  hastes/m<sup>2</sup> (P5, troço denso);
- um troço de transição com 10 cm de comprimento com um  $m$  médio de 980 hastes/m<sup>2</sup>, dividido em dois troços de 5 cm com 1200 e 800 hastes/m<sup>2</sup>, respectivamente de montante para jusante, correspondendo a um troço com  $dm/dx < 0$  (P2 e P6);
- um troço com 15 cm de comprimento com  $m = 400$  hastes/m<sup>2</sup> (P3, troço esparso);
- um troço de transição com 10 cm de comprimento com um  $m$  médio de 980 hastes/m<sup>2</sup>, dividido em dois troços de 5 cm com 800 e 1200 hastes/m<sup>2</sup>, respectivamente de montante para jusante, correspondendo a um troço com  $dm/dx > 0$  (P4).

O parâmetro  $m$  é determinado como o número de hastes por unidade de área em planta medida considerando uma região suficientemente grande para abranger várias hastes, mas menor do que a escala de comprimento característico dos gradientes espaciais.

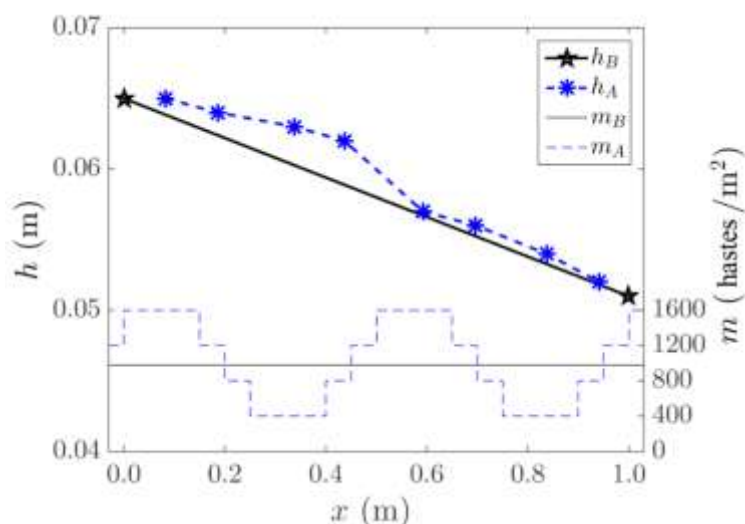
Na configuração B, um troço com 3.5 m de comprimento foi preenchido com o mesmo número de hastes da configuração A distribuídas de acordo com uma distribuição uniforme de  $m = 980$  hastes/m<sup>2</sup>.



**Figura 1.** Vista em planta do troço coberto por hastes nas zonas de medição na (a) Configuração A e (b) Configuração B. As linhas na direção do escoamento representam a localização dos planos verticais medidos com o PIV e os retângulos identificam a localização dos planos horizontais.

Escoamentos gradualmente variados com números de Reynolds similares revelaram, para troços com a mesma quantidade de hastes, uma variação global da altura do escoamento semelhante em ambos os testes, como se mostra na Fig. 2. Esta observação indica que a força de arrastamento total nas hastes ao longo dos troços analisados é aproximadamente a mesma em ambos os testes, independentemente do tipo de distribuição das hastes. Assim, a presente investigação tem por objetivo discutir a distribuição das variáveis do escoamento envolvidas no balanço de quantidade de movimento. Em particular, serão discutidas as diferenças na distribuição das variáveis na configuração B e nos troços de transição da configuração A. Estes troços têm o mesmo valor de  $m$ , mas apresentam sinais diferentes para  $dm/dx$ , permitindo discutir o impacto da distribuição espacial das hastes nas variáveis do escoamento.

A estrutura vertical do escoamento em zonas ocupadas com hastes rígidas é definida por três camadas: uma camada junto ao fundo, onde o escoamento é tridimensional devido à interação com o leito; uma camada fina perto da superfície livre, que é afetada pelas suas oscilações; e uma camada intermédia, suficientemente afastada do leito e da superfície livre, onde o escoamento é controlado pelas hastes verticais e onde as variáveis do escoamento são aproximadamente constantes na direção vertical (Ferreira *et al*, 2009; Ricardo, 2014; Ricardo *et al*, 2014). O presente trabalho foca-se essencialmente nesta camada intermédia, onde a velocidade vertical média é quase zero (Ferreira *et al*, 2009).



**Figura 2.** Perfil longitudinal da altura do escoamento dos testes em regime gradualmente variado em ambas as configurações. A densidade de hastes é indicada pelo segundo eixo vertical.

### 3. INSTALAÇÕES LABORATORIAIS E INSTRUMENTAÇÃO

Quatro testes experimentais foram realizados no canal de recirculação e inclinação variável (CRIV) do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura do Instituto Superior Técnico. O CRIV tem 12.5 m de comprimento, 40.9 cm de largura e 50 cm de altura e é constituído por paredes laterais de vidro permitindo medições com técnicas baseadas na visualização do escoamento e iluminação laser. O fundo do canal foi coberto com uma camada de cascalho e areia de 2.5 cm de espessura. As hastes cilíndricas foram colocadas aleatoriamente ao longo de 3.5 m, simulando condições de vegetação rígida emergente. Para permitir medições de velocidade, criaram-se faixas estreitas sem hastes na direção lateral (zonas de medição identificadas na Fig. 1), cuja largura é igual à distância média entre hastes do troço imediatamente a montante. Os elementos cilíndricos tinham 1.1 cm de diâmetro e cerca de 20 cm de altura. O escoamento era controlado por uma soleira de gravilha grosseria a jusante da zona coberta com hastes.

Foram realizados dois ensaios para cada configuração (A1, A2, B1 e B2), utilizando diferentes caudais ou inclinações do fundo. A aquisição de dados foi realizada em quatro zonas de medição, cobrindo um comprimento de onda da distribuição de hastes na configuração A (Testes A1 e A2) e numa de medição para a configuração B (Testes B1 e B2), como mostrado na Fig. 1. Os testes A1, A2 e B1 foram realizados com caudal igual a 2.3 L/s, enquanto no teste B2 o caudal foi de 4.5 L/s. Nos testes A1 e B1, o canal estava horizontal e o escoamento era gradualmente variado, acelerando para a jusante. Nos testes A2 e B2, o escoamento era quase uniforme e o fundo do canal tinha uma inclinação de 0.9 e 2.9%, respetivamente. A superfície livre exibiu um comportamento oscilante, com amplitudes menores que 2.5 mm. Uma folha de acetato com 0.2 mm de espessura foi colocada na superfície livre para garantir a estabilidade ótica e a redução de reflexões do feixe de laser durante as medições.

O Quadro 1 resume as principais características dos testes laboratoriais. O parâmetro  $x_0$  é a distância longitudinal medida a partir do início do troço com hastes. O valor de  $dm/dx$  indica se  $m$  aumenta, diminui ou é constante num determinado troço,  $U$  é o valor médio na coluna

de água da média espaço-temporal da velocidade longitudinal e  $Re_p = Ud/\nu$  é o número de Reynolds com base no diâmetro das hastes, sendo  $\nu$  a viscosidade cinemática da água.

**Quadro 1.** Características da distribuição de hastes e propriedades do escoamento para cada teste.

Teste	Zona de medição	$x_0$ (m)	$m$ (hastes/m <sup>2</sup> )	$dm/dx$ (-)	$U$ (m/s)	$h$ (m)	$Re_p$ (-)
A1	P5	2.69	1600	0	0.103	0.057	1300
	P2	2.28	980	<0	0.083	0.064	1158
	P3	2.44	400	0	0.090	0.063	1237
	P4	2.54	980	>0	0.099	0.062	1303
A2	P5	2.69	1600	0	0.094	0.065	1307
	P6	2.79	980	<0	0.098	0.064	1369
	P3	2.44	400	0	0.090	0.067	1230
	P4	2.54	980	>0	0.092	0.066	1266
B1	Up	1.90	980	0	0.090	0.065	1066
B2	Up	1.90	980	0	0.134	0.084	1685

As medições consistiram em mapas de velocidade instantânea adquiridos com um sistema 2D *Particle Image Velocimetry* (PIV) de 30 mJ, operado a uma taxa de aquisição de 15 Hz e com um tempo entre pulsos de 1500  $\mu$ s e utilizando partículas de poliuretano como partículas traçadoras. Detalhes sobre o sistema PIV e as partículas traçadoras podem ser consultados em Ricardo (2014). Os mapas de velocidade foram adquiridos em planos horizontais ( $u$  e  $v$ ) e verticais ( $u$  e  $w$ ) como indicado na Fig. 1. Na configuração A, as medições foram realizadas em nove planos verticais em cada zona de medição, adquirindo  $10 \times 573$  pares de imagens, representando um tempo de aquisição total de 6 min 22 s. No plano horizontal, foram adquiridos dois mapas com cerca de 9.5 cm de comprimento e 12.5 cm de largura às cotas  $z/h \cong 0.25; 0.60; 0.90$  no teste A1 e em  $z/h \cong 0.08; 0.60$  no teste A2. Em cada aquisição foram guardados 5000 pares de imagens, correspondendo a 5.5 minutos de dados consecutivos. Em relação ao teste B1, as medições verticais foram realizadas em 18 planos verticais e dois planos horizontais no centro do canal nas cotas  $z/h \cong 0.25; 0.60; 0.90$ , adquirindo 5000 pares de imagens consecutivos. No teste B2 foram adquiridos 18 planos verticais e 7 planos horizontais ( $z/h \cong 0.05; 0.10; 0.20; 0.33; 0.45; 0.50; 0.65$ ), guardando 5000 pares de imagens consecutivamente.

Na discussão dos resultados, é dada especial atenção à comparação dos troços com a mesma densidade média de hastes e com diferentes distribuições espaciais: A-P2 com  $dm/dx < 0$ , A-P4 com  $dm/dx > 0$  e B-Up com  $dm/dx = 0$ .

## 4. RESULTADOS

### 4.1 MÉDIA DUPLA ESPAÇO-TEMPORAL

A média espacial para uma variável genérica média no tempo,  $\bar{\theta}$ , numa determinada cota  $z$ , é dada por:

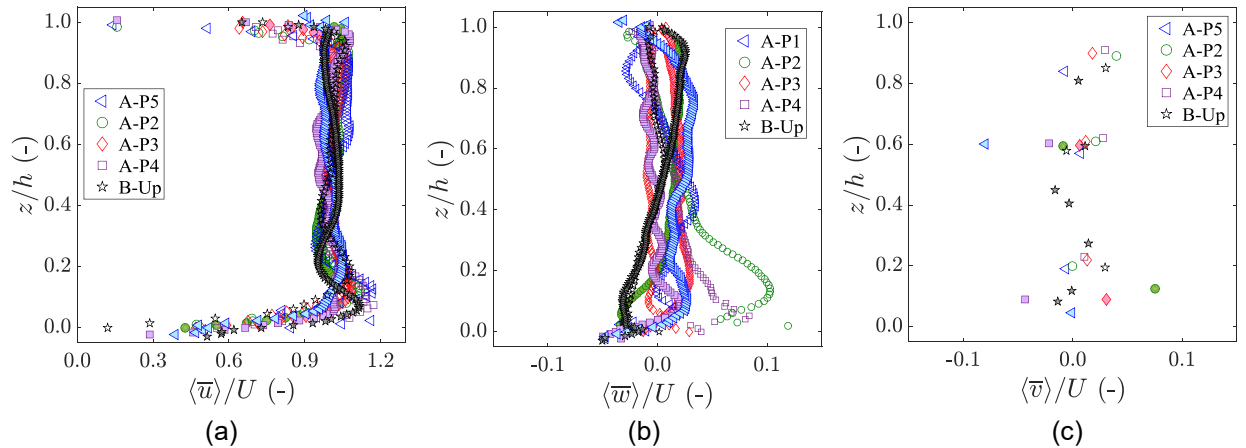
$$\langle \bar{\theta} \rangle(z) \approx \frac{\sum_{k=1}^{N-N_0(z)} \bar{\theta}_k(z) A_k(z)}{\sum_{k=1}^{N-N_0(z)} A_k(z)} \quad (1)$$

em que  $A_k(z)$  é a área do subdomínio convexo  $\Omega_k$ , definida como a área de influência de  $(x_k, y_k) \in ]0, L_x[ \times ]0, L_y[$ ,  $N$  corresponde ao número total de subdomínios e  $N_0(z)$  ao número de subdomínios, à cota  $z$ , para o qual a variável do escoamento não está definida em  $(x_k, y_k)$ . Deve notar-se que  $\sum_{k=1}^{N-N_0(z)} A_k(z) < A_k$  para  $N_0(z) > 0$ .

## 4.2 Velocidades

A Figura 3 mostra a distribuição vertical das três componentes da velocidade média espácio-temporal para cada zona de medição. A velocidade longitudinal apresenta uma distribuição constante na região controlada pelas hastes verticais. Os perfis verticais de  $\langle \bar{u} \rangle / U$  apresentam uma forma semelhante em todos os testes, colapsando praticamente no mesmo perfil, conforme se observa na Fig. 3(a). Nas camadas inferiores, abrangendo o máximo de  $\langle \bar{u} \rangle / U$ , os perfis exibem uma protuberância pronunciada, também reportada em Stoesser *et al.* (2010). A velocidade longitudinal diminui logarithmicamente desde o seu valor máximo até zero ao aproximar-se do leito, onde se aplica a condição de não deslizamento devido ao fundo ser fixo. Em relação à velocidade vertical, os perfis verticais de média dupla exibem valores próximos de zero em toda a coluna de água exceto junto ao fundo onde o escoamento interage com o leito induzindo movimentos ascendentes e descendentes. O perfil vertical da velocidade lateral média dupla também é aproximadamente zero.

No plano horizontal foram observados os padrões de velocidades altas alternadas com velocidades baixas característicos dos escoamentos de esteiras (Stoesser *et al.*, 2010; Ricardo *et al.*, 2014) para todas as densidades de hastes testadas. Na configuração B ( $m$  constante) foram registados gradientes laterais da velocidade média no tempo menores do que os registados nos troços  $dm/dx \neq 0$  da configuração A (P2 e P4). Em geral, a variabilidade da distribuição espacial das hastes tem impacto nos gradientes locais do campo de velocidades.

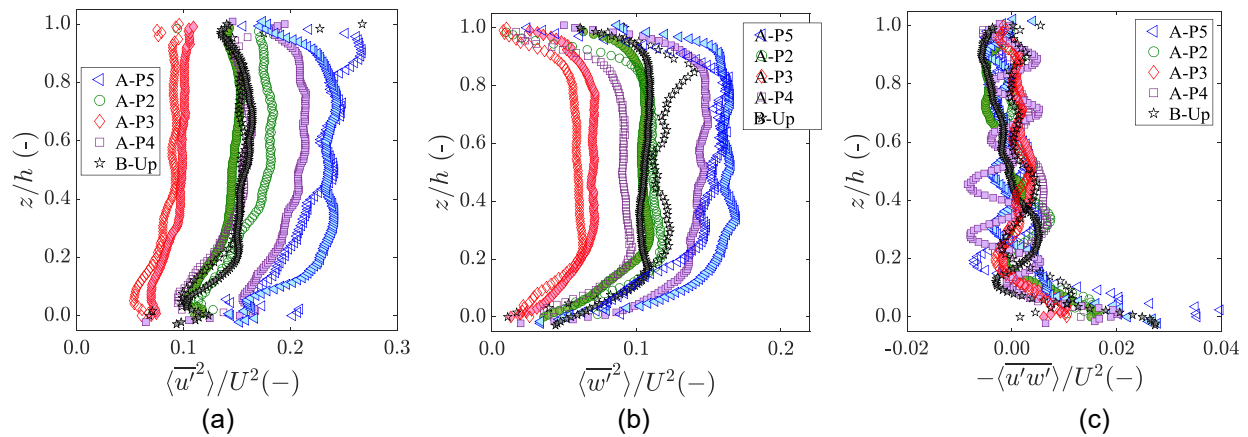


**Figura 3.** Perfis de velocidade média dupla espácio-temporal normalizados por  $U$ : (a) longitudinal; (b) vertical; (c) lateral. Os símbolos sem preenchimento correspondem aos testes A1 e B1 enquanto os símbolos preenchidos identificam os testes A2 e B2.



### 4.3 Tensões de Reynolds

Na Figura 4 são apresentados perfis de média dupla das tensões turbulentas. As componentes normais, longitudinal e vertical, apresentam magnitudes semelhantes e aumentam ambas com  $m$ , indicando que a turbulência, no espaço entre hastes, é influenciada pela densidade de hastes. A tensão de corte (Fig. 4c) apresenta magnitudes muito pequenas, quase desaparecendo na região controlada pelas hastes. Quanto à forma do perfil, as tensões normais longitudinais têm uma distribuição quase constante na zona controlada pelas hastes, com pontos de inflexão nos limites dessa camada. As tensões normais verticais também exibem um perfil constante na maior parte da coluna de água, diminuindo para zero junto ao fundo e à superfície livre.



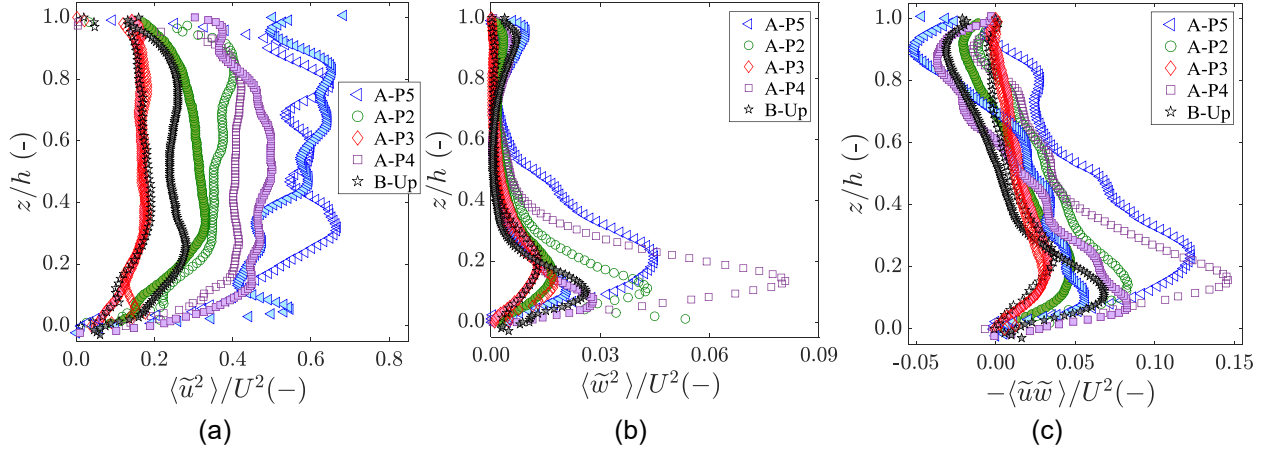
**Figura 4.** Perfis de tensões de Reynolds médias duplas espaço-temporais: (a) normal longitudinal; (b) normal vertical; (c) de corte longitudinal-vertical. Os símbolos sem preenchimento correspondem aos testes A1 e B1 enquanto os símbolos preenchidos identificam os testes A2 e B2.

As comparações entre os troços com o mesmo  $m$  e diferentes  $dm/dx$  sugerem que as tensões de Reynolds, à escala do espaçamento médio entre hastes, não mostram sensibilidade aos gradientes longitudinais da distribuição de hastes, pois as magnitudes destas tensões são muito semelhantes para A-P2, A-P4 e B-Up (Fig. 4a,b). Este resultado indica que a turbulência de escoamentos por entre hastes rígidas parece ajustar-se localmente às variações de  $m$ .

### 4.3 Tensões dispersivas

A Figura 5 mostra os perfis verticais de tensões dispersivas normais longitudinais e verticais e tensões dispersivas de corte longitudinais-verticais. A componente normal longitudinal da tensão dispersiva, que representa a correlação das flutuações espaciais da velocidade longitudinal, é a variável adequada para expressar a heterogeneidade de escoamentos em zonas povoadas por vegetação rígida. Globalmente, sua magnitude aumenta com  $m$ , e é maior do que a magnitude das correspondentes tensões turbulentas, destacando sua importância no equilíbrio da quantidade de movimento. A magnitude das tensões dispersivas normais verticais também aumenta com  $m$ , mas apresenta uma ordem de magnitude inferior à componente longitudinal. As tensões de corte dispersivas também apresentam valores próximos de zero na zona controlada pelas hastes.





**Figura 5.** Perfis de tensões dispersivas médias duplas espaço-temporais: (a) normal longitudinal; (b) normal vertical; (c) de corte longitudinal-vertical. Os símbolos sem preenchimento correspondem aos testes A1 e B1 enquanto os símbolos preenchidos identificam os testes A2 e B2.

Para os troços com o mesmo  $m$  e diferentes  $dm/dx$ , os resultados apresentados na Fig. 5 indicam que o escoamento médio apresenta maior variabilidade espacial nos troços de transição da configuração A, P2 e P4 ( $m$  variável) do que na distribuição uniforme da configuração B ( $m$  constante). Os valores mais elevados das tensões dispersivas normais longitudinais registadas no troço P2, onde  $m$  diminui ( $dm/dx < 0$ ), em relação à configuração B, expressam uma complexidade espacial não traduzida apenas pelo valor local de  $m$ . Pressupõe-se que essa complexidade espacial tenha sido gerada mais a montante (ver p<sub>1-2</sub> Fig. 1a) e transportada para jusante. A subsistência dessa complexidade gerada a montante pode ser descrita como uma forma de memória espacial do fluxo.

O escoamento estudado neste trabalho ocorre por entre hastes dispostas aleatoriamente, o que reduz a coerência da organização espacial do escoamento médio no tempo, justificando a curta memória espacial. No troço P3, representativo da menor densidade de hastes, os valores das tensões dispersivas são mais baixos do que no troço P2, o que indica que a memória espacial subsiste por menos de  $15d$ . Em P4, a complexidade gerada nas regiões de menor  $m$  é combinada com a variabilidade espacial do campo médio gerada pela linha de hastes imediatamente a montante da zona de medição, a que corresponde o maior valor de  $m$  entre P3 e P4. Esta observação destaca a natureza aditiva desta memória espacial, na medida em que esta está associada ao efeito cumulativo da variabilidade espacial. Isto é, a complexidade gerada a montante contribui para aumentar a variabilidade espacial local, mas uma complexidade espacial baixa (ou nula) transportada de montante não diminui o nível de variabilidade espacial local. Assim, o efeito da variação de  $m$  é corresponde sempre a um aumento das tensões dispersivas em relação a uma distribuição uniforme com o mesmo  $m$ .

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho estudou escoamentos por entre hastes circulares, rígidas e emergentes, distribuídas aleatoriamente com densidades de hastes constantes e variáveis, à escala do espaçamento médio entre hastes. As diferenças entre as distribuições uniformemente distribuídas e espacialmente variáveis do mesmo número de hastes na média dupla espaço-temporal das variáveis do escoamento foram discutidas neste trabalho. As tensões de Reynolds revelaram ser completamente determinadas pela densidade de hastes local,

não apresentando sensibilidade aos gradientes espaciais locais da distribuição de hastes. Contrariamente, as tensões dispersivas são afetadas pelos gradientes longitudinais da densidade de hastes, aumentado relativamente a distribuições uniformes com a mesma densidade de hastes. No entanto, este aumento apresenta taxas diferentes em função do gradiente da distribuição das hastes. Este comportamento parece ser explicado por uma memória espacial aditiva que se manifesta pela subsistência a jusante de complexidade espacial gerada a montante combinada com a complexidade gerada localmente.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi parcialmente financiado pelos fundos FEDER, programa COMPETE e pelo projeto PTDC/ECM-HID/6387/2014 e bolsa SFRH/BPD/93903/2013 financiados pela FCT.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Ferreira R.M.L., Ricardo A.M., Franca M.J. (2009). Discussion of “Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders” by H.M. Nepf & Y. Tanino, *J Hydraul Eng* 134(1), 2008. *J. Hydraulic Eng.* 135(8), 690–693.
- Kadlec R.H. (1990). Overland flow in wetlands: Vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Engineering* 116(5), 691–705.
- Meire D.W. S. A., Kondziolka J. M., and Nepf H. M. (2014). Interaction between neighboring vegetation patches: Impact on flow and deposition. *Water Resour. Res.* 50(5), 3809–3825.
- Nikora V., McEwan I., McLean S., Coleman S., Pokrajac D., Walters R. (2007). Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background. *J. Hydraulic Eng.* 133 (8), 873–883.
- Nepf H. (2012). Flow and transport in regions with aquatic vegetation. *Annual Review of Fluid Mechanics* 44, 123–142.
- Ricardo, A. M. (2014). Hydrodynamics of turbulent flows within arrays of circular cylinders. Tese de doutoramento, École Polytech. Fédérale de Lausanne e Universidade de Lisboa.
- Ricardo A.M., Koll K., Franca M.J., Schleiss A.J., Ferreira R.M. (2014). The terms of turbulent kinetic energy budget within random arrays of emergent cylinders. *Water Resources Research* 50(5), 4131–4148.
- Schoelynck J., De Groote T., Bal K., Vandenbruwaene W., Meire P., Temmerman S. (2012). Self-organised patchiness and scale-dependent bio-geomorphic feedbacks in aquatic river vegetation. *Ecography* 35(8), 760–768.
- Stoesser T., Kim S., Diplas P. (2010). Turbulent flow through idealized emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering* 136(12), 1003–1017.
- Tanino Y., Nepf H.M. (2008). Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. *J Hydraulic Eng* 134(1), 34–41.
- Yan C., Nepf H., Huang W.-X., Cui G.-X. (2017). Large eddy simulation of flow and scalar transport in a vegetated channel. *Environmental Fluid Mechanics*, 17, 497–519.