



## INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NAS TRANSFERÊNCIAS DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO LATERAIS

Cátia TABORDA<sup>1</sup>, Cristina FAEL<sup>1</sup>, César SANTOS<sup>1</sup>, Ana RICARDO<sup>2</sup>, Rui FERREIRA<sup>3</sup>

1. CMADE - Universidade de Beira Interior, Rua Marquês D'Avila e Bolama, 6201-001 Covilhã, [csbt@ubi.pt](mailto:csbt@ubi.pt), [cmsf@ubi.pt](mailto:cmsf@ubi.pt), [a34474@ubi.pt](mailto:a34474@ubi.pt)

2. CERIS, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, [ana.ricardo@tecnico.ulisboa.pt](mailto:ana.ricardo@tecnico.ulisboa.pt)

3. CERIS - Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa [ruimferreira@tecnico.ulisboa.pt](mailto:ruimferreira@tecnico.ulisboa.pt)

### RESUMO

Nesta comunicação analisam-se os resultados experimentais obtidos num canal parcialmente vegetado, constituído por um corredor de matriz escalonada emergente rígida, visando estudar a influência da vegetação nas transferências laterais de massa e quantidade de movimento. É ainda quantificado a espessura da camada de mistura, através de modelos teóricos, dado que desempenha um papel significativo nessas transferências. A análise é complementada com o estudo da presença das estruturas coerentes de larga escala que promovem a transferência de massa e de quantidade de movimento através do escoamento turbulento que ocorre entre o canal central e o corredor vegetado.

**Palavras-Chave:** canal parcialmente vegetado; vegetação emersa rígida; interface; transferências laterais.

### 1. INTRODUÇÃO

A presença de vegetação nas margens de cursos de água, além de contribuir para manter a biodiversidade ambiental, pode ter como função a sua estabilização ou a sedimentação do material sólido transportado pelo escoamento. Esta vegetação pode ser flexível ou rígida, submersa ou parcialmente submersa e ainda com ou sem folhagem. Quando constituída por árvores ou arbustos de diferentes tipos e diversos espaçamentos, apresenta um comportamento praticamente rígido, com uma secção transversal aproximadamente circular (Ghisalberti et al. 2006). Aspeto que leva a que diversos trabalhos experimentais utilizaram hastes cilíndricas rígidas representativas de vegetação natural (White & Nepf 2008). Apesar da influência da vegetação depender do tipo de elementos que a compõe, o aspeto mais relevante no estudo de escoamentos em cursos de água parcialmente vegetados é a sua forte interação com o canal principal. A vegetação atua como elemento de rugosidade, diminuindo a velocidade do escoamento e direcionando o escoamento para áreas sem vegetação, gerando uma camada de mistura na sua interface, particularmente turbulenta, com implicações nas transferências de massa e de quantidade de movimento (Dupuis *et al.*, 2017). A compreensão da camada de mistura, do seu desenvolvimento espacial ao longo da secção transversal, permite ter conhecimento da difusão e deposição de material sólido suspenso, quer ele se trate de nutrientes, cinzas ou poluentes químicos.

### 2. ENQUADRAMENTO

#### 2.1. Previsão da largura da camada de mistura

A principal característica hidrodinâmica da camada de mistura é a forte inflexão no perfil transversal de velocidade longitudinal, que se desenvolve ao longo da interface entre a margem vegetada e o canal central, sendo um ponto de instabilidade, designado por instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Ao longo dos anos, a camada de mistura tem sido caracterizada como a largura máxima associada ao declive do perfil de velocidades (Raupach *et al.*, 1996). Vários estudos estabeleceram equações de previsão do desenvolvimento transversal das velocidades longitudinais. No entanto, apenas alguns se concentraram em determinar a espessura da camada de mistura em canais parcialmente vegetados, nomeadamente: White & Nepf (2008), considerando um perfil de tangente hiperbólica

para a zona com vegetação e o gradiente máximo do perfil transversal da velocidade longitudinal, para o canal principal; e Pope (2000) utilizando o método 10/90.

## 2.2. Escalas integrais do escoamento turbulento

Um aspeto recorrente quando se consideram os escoamentos turbulentos é encontrar um comprimento e período de tempo adequados para análise, característico do amplo espectro de escalas no escoamento. Esse aspeto garante que a área ou volume de análise experimental ou numérica seja suficiente para capturar os fenómenos turbulentos e compreender os processos de produção e dissipação de energia (Monim and Yaglom 1972). Uma escala de tempo integral,  $T$ , pode fornecer convenientemente informações úteis sobre a presença e coerência de estruturas turbulentas, uma vez que é uma medida do efeito memória no campo de escoamento da persistência de um vórtice de grande escala (Caroppi, 2018). Dado que, as medições foram realizadas através de uma sonda estacionária numa determinada posição, as escalas integrais espaciais,  $L$ , foram determinadas assumindo a hipótese de Taylor  $L = Tu$ . Onde  $u$  é a velocidade média num determinado ponto.

## 3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E MÉTODOS

O trabalho experimental foi realizado no Canal de Estruturas Hidráulicas existente no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas do DECA-UBI. O corredor com vegetação emergente, constituído por uma matriz escalonada, foi inserido no lado direito do canal, numa extensão de 6,00 m de comprimento e 0,30 m de largura. A matriz foi realizada com tubos cilindros rígidos com 1 cm de diâmetro e 15 cm de altura, com duas densidades das matrizes,  $D$ , 500 hastes.m<sup>-2</sup> e 1034 hastes.m<sup>-2</sup>, R1 e R2, respetivamente. Os ensaios experimentais foram realizados em condições de escoamento em equilíbrio uniforme para uma profundidade do escoamento de 10 cm, valor médio na seção de medição, e para um caudal de 104 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>.

## 4. CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

Seguidamente apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais, caracterizando a turbulência do escoamento, bem como as transferências de massa e quantidade de movimento que ocorrem entre a área vegetada e o canal central. Na Figura 1 apresenta-se a distribuição transversal das velocidades longitudinais, tensões tangenciais de Reynolds,  $\tau_{uv}$ , e as intensidades turbulentas longitudinais,  $\sigma_u$ , para as séries experimentais R1 e R2.

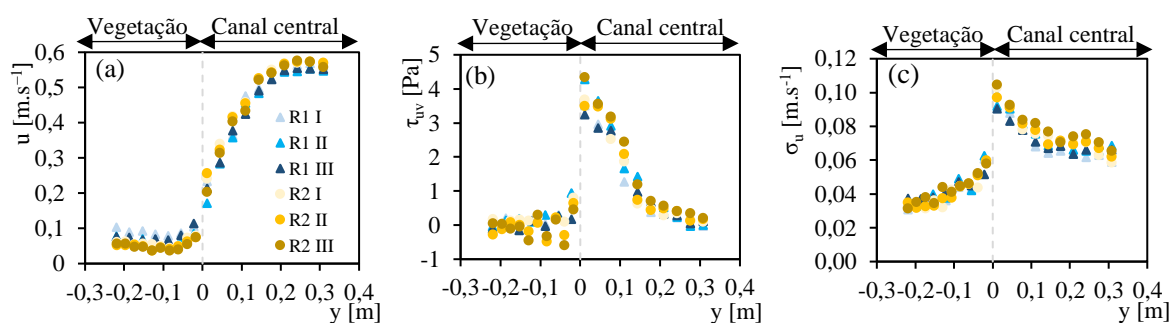


Figura 1. Perfil transversal: (a) velocidade longitudinal; (b) Tensões tangenciais de Reynolds,  $\tau_{uv}$ ; (c) Intensidades turbulentas longitudinais,  $\sigma_u$

A análise da Figura 1a permite constatar que o corredor lateral vegetado influencia fortemente a componente longitudinal das velocidades do escoamento na sua proximidade. As velocidades tomam valores máximos de 0,58 ms<sup>-1</sup>, na zona central do canal principal, e valores mínimos de  $\approx 0,04$  ms<sup>-1</sup>, no interior do corredor com hastes. É ainda possível observar-se que o gradiente das velocidades aumenta com a densidade da vegetação, consequentemente, diminuindo a penetração da camada de mistura. A análise da Figura 1b permite verificar que as tensões tangenciais de Reynolds são aproximadamente nulas no interior do corredor lateral vegetado ( $\approx 0,03$  Pa) e apresenta valores positivos no canal central, aumentando a sua intensidade com a aproximação ao corredor vegetado. O valor máximo situa-se na zona da interface ( $\approx 4,3$  Pa). A penetração da camada de corte, que está

diretamente relacionada com a presença e intensidade das estruturas de grande escala, diminui com o aumento da densidade da vegetação, como já exposto por White & Nepf (2008). Esta distância é a posição para a qual  $\tau_{uv}$  decai para 10% do valor máximo atingido na interface. Todos os perfis de intensidade turbulenta longitudinal (Figura 1c) apresentam um pico na interface no lado do canal central. Na zona central da área vegetada e no canal central a intensidade turbulenta decresce até se atingir um gradiente quase nulo. Foram ainda analisados os momentos de terceira ordem, tendo sido observado que a distorção existe quer longitudinal quer transversalmente. Esse fato indica que as transferências de massa e quantidade de movimento ocorrem com fenómenos de varrimento para a zona vegetada ( $Sk_u > 0$  e  $Sk_v < 0$ ), com mais significância na interface, e com fenómenos de ejeção ( $Sk_u < 0$  e  $Sk_v > 0$ ) para o canal principal, onde a velocidade é consideravelmente maior. Esses eventos estão diretamente associados à presença de estruturas coerentes de grande escala (White & Nepf, 2008; Dupuis *et. al.*, 2017; Caroppi, 2018).

## 5. IDENTIFICAÇÃO DA DIFUSÃO DA MASSA E QUANTIDADE DE MOVIMENTO

### 5.1. Espessura da camada de mistura

A espessura da camada de mistura horizontal,  $\delta$ , para as séries experimentais R1 e R2 foi avaliada utilizando os métodos referidos na Secção 2.1. Para todos os modelos teóricos, o  $\delta$  diminui quando a densidade da vegetação aumenta. Nesses sistemas, o diferencial de velocidade entre as duas áreas contíguas do canal, resultante do arrasto na vegetação, governa a penetração da camada de mistura na vegetação (White & Nepf, 2008; Dupuis *et al.*, 2017 e Caroppi 2018). Verifica-se que a dimensão da camada de mistura não é definida de igual forma pelos diferentes métodos. O método 10/90 e o do Perfil da tangente hiperbólica são penalizadores para a camada interior.

### 5.2. Macro-escala temporal do escoamento turbulento

Na Figura 2 apresenta-se o desenvolvimento longitudinal da escala temporal lateral das estruturas coerentes ao longo da interface e a função de autocorrelação das velocidades laterais, para ambas as séries experimentais (R1 e R2). A figura permite verificar que as estruturas são coerentes por períodos de maior duração no caso da série experimental R1, com menor densidade de vegetação. Esta ligeira perda de coerência das estruturas para o caso da série experimental R2 pode estar relacionada com o aparecimento de pequenas estruturas gerando instabilidade tridimensional.

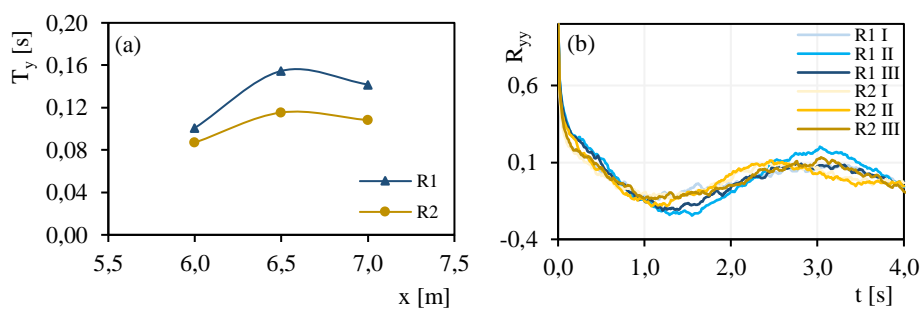


Fig. 2. (a) Evolução longitudinal da escala temporal ao longo da interface; (b) Função de autocorrelação das velocidades laterais,  $R_{yy}$ , na interface

### 5.3. Envoltório de transferências de massa e quantidade de movimento

Com o intuito de quantificar o tamanho, intensidade e localização das estruturas coerentes que promovem o transporte lateral de massa e quantidade de movimento, é estudado o coeficiente de correlação longitudinal-transversal,  $r_{uv}$ . Apesar do perfil transversal das velocidades longitudinais e das tensões tangenciais de Reynolds serem muito semelhantes para as duas séries experimentais, a eficiência do transporte lateral é bastante diferente. Para R1 o valor máximo de  $r_{uv} = 0,62$  enquanto para R2 é  $r_{uv} = 0,45$ . Em todas as séries experimentais  $r_{uv}$  atinge o valor máximo onde as tensões tangenciais de Reynolds atinge o máximo. O decréscimo de  $r_{uv}$  é maior dentro da vegetação para R2, destacando-se a menor capacidade de entrada do vórtice.

A influência da vegetação nas estruturas coerentes de larga escala pode ser claramente observada nos espectros de potência das flutuações de velocidade lateral,  $S_{yy}$ . Os espectros de potência das flutuações de velocidade lateral (Figura 3) revelam a presença de estruturas coerentes de larga escala bidimensionais pois apresentam densidade espectral de potência localizada na faixa de frequências contendo energia, seguido de uma inclinação adjacente de -3. Para a série R1, os resultados no corredor vegetado (Figura 3a) sugerem que existe um pico com maior amplitude do que para R2. A ordem de magnitude de  $S_{yy}$  dentro da camada de mistura é superior à verificada fora dela. Então, o pequeno pico que se observa no corredor vegetado para R2 (Figura 8a) pode corresponder a uma interferência da estrutura coerente adjacente, pois apresenta apenas uma pequena coerência. Desta forma pode-se confirmar os valores propostos através da observação do perfil transversal das velocidades longitudinais para a camada de mistura interior,  $\delta_I$ . A camada de mistura vai além dos valores previstos pelos métodos teóricos. No canal principal, a diferença de densidade da vegetação lateral já não se faz sentir, uma vez que os espectros são bastante idênticos, o que seria expectável.

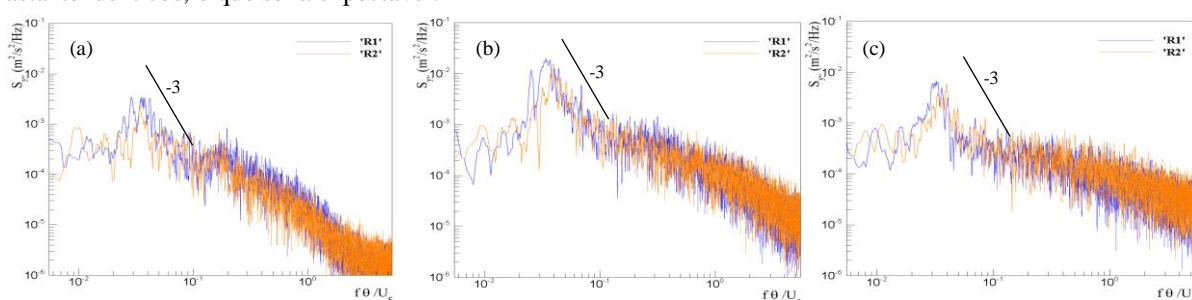


Figura 3. Espectros de potência das flutuações da velocidade lateral: (a) corredor vegetado; (b) interface; (c) canal central

## 6. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu concluir que o corredor lateral vegetado influencia a penetração da camada de corte, estando diretamente relacionada com a presença e intensidade das estruturas de grande escala. Estas estruturas bidimensionais facilitam a transferência de massa e de quantidade de movimento através do escoamento turbulento que ocorre entre o canal central e o corredor vegetado. As estruturas apresentam-se coerentes por períodos de maior duração no caso da vegetação de menor densidade, podendo estar associado à maior capacidade de entrada de vórtices.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do Projeto PTDC/ECI-EGS/29835/2017 - POCI-01-0145-FEDER-029835.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caroppi G (2018) Turbulence in partly vegetated channels: Experiments with complex morphology vegetation and rigid cylinders PhD Thesis. University of Naples Federico, Italy
- Dupuis, V., Proust, S., Berni, C., Paquier, A., (2017) Mixing layer development in compound channel flows with submerged and emergent rigid vegetation over the floodplains. *Exp. Fluids* 58
- Ghisalberti, M., and H. Nepf (2006), The structure of the shear layer over rigid and flexible canopies, *Environ. Fluid Mech.*, 6(3), 277 – 301
- Monin, A. S., and A. M. Yaglom (1971) *Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence*. Vol. 1. MIT Press, 769 pp.
- Pope S (2000) *Turbulent Flows*. In: Cambridge: Cambridge University Press
- Raupach MR, Finnigan JJ, Brunet Y (1996) Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing layer analogy. In: *Boundary-Layer Meteorology*, 78, 351–382
- White B, Nepf H (2008) A vortex-based model of velocity and shear stress in a partially vegetated shallow channel. In: *Water Resources Research*, 44, W01412