

Validação de um modelo computacional representando uma mancha de vegetação aquática

Computational validation of an aquatic vegetation patch

(Recepção 28/01/2021; Aceitação 14/06/2021)

Yamasaki, T.N.¹; Janzen, J.G.¹

¹ Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
 Telefone: +55 67 33457676
 Email: taisnatsumi@gmail.com

Resumo. A vegetação aquática desempenha um importante papel ecológico em corpos d'água, como rios, lagoas e estuários, e esse papel deriva, em parte, das interações hidrodinâmicas entre a vegetação e o escoamento. O objetivo deste estudo foi validar uma mancha de vegetação a partir de um modelo em escala de laboratório, utilizando a Fluidodinâmica Computacional (CFD). A validação foi obtida com a representação geométrica da mancha, o estudo de convergência de malha e a configuração das condições iniciais e de contorno do domínio.
Palavras-chave. CFD; validação; vegetação aquática.

Abstract. Aquatic vegetation plays an important ecological role in water bodies, such as rivers, lakes and estuaries, and this role partly comes from the hydrodynamic interactions between the vegetation and the flow. The goal of this study was to validate a vegetation patch based on a laboratory-scale model, using Computational Fluid Dynamics (CFD). The validation was obtained with the geometrical representation of the patch, the grid convergence study and the setup of the initial and boundary conditions of the domain.

Keywords. CFD; validation; aquatic vegetation.

1. Introdução

A vegetação aquática promove diversas funções ecológicas, o que se deve à sua capacidade em modificar o escoamento em termos de velocidade, turbulência e pressão (Nepf, 2012; Maji et al., 2020). Por exemplo, a vegetação reduz a velocidade do escoamento em seu interior e a jusante, o que auxilia no abrigo de organismos aquáticos (Van Katwijk et al., 2010) e na retenção de sedimentos e nutrientes (Kleeberg et al., 2010). Especificamente na escala correspondente a manchas de vegetação, que vão de centímetros a poucos metros, estudos têm sido empregados na compreensão da hidráulica de canais (Sukhodolov e Sukhodolova, 2005; Green, 2006), na retenção e disposição de sedimentos (Bouma et al., 2007) e na evolução da vegetação (De Lima et al., 2015; Yamasaki et al., 2019).

O uso de modelos computacionais vem crescendo na pesquisa de escoamentos vegetados (D'Ippolito et al., 2021), especialmente com a Fluidodinâmica Computacional (CFD). O CFD constitui uma técnica poderosa, capaz de solucionar numericamente as equações discretizadas da conservação da quantidade de movimento e de massa, e de obter resultados com alto detalhamento e de forma não intrusiva. No entanto, é necessário que o modelo numérico seja validado com dados medidos antes de ser utilizado. Considerando a validação como uma etapa fundamental na modelagem em CFD, o objetivo do trabalho foi validar numericamente o modelo de um escoamento atravessando uma mancha de vegetação, que poderá servir como base para futuros estudos relacionados a escoamentos vegetados.

2. Material e métodos

A mancha de vegetação foi baseada em um dos modelos criados em laboratório por Zong e Nepf (2011), e possuiu diâmetro $D = 22$ cm. A mancha foi composta por um arranjo de cilindros de diâmetro $d = 0.64$ cm cada, área frontal por volume $a = 0.06$ cm⁻¹ e fração volumétrica sólida $\phi = 0.03$. No modelo CFD, os cilindros foram distribuídos uniformemente dentro do perímetro da mancha, como um arranjo de pequenos obstáculos centrados em retículos de 3.3 cm de lado (Fig. 1). A mancha foi representada bidimensionalmente, isto é, o eixo vertical foi considerado unitário, visto que efeitos relacionados à camada de fundo são secundários para manchas de vegetação emergentes (Zong e Nepf, 2011). A mancha foi disposta dentro de um canal retangular de comprimento $L = 1300$ cm e largura $W = 120$ cm, similar ao aparato experimental de Zong e Nepf (2011).

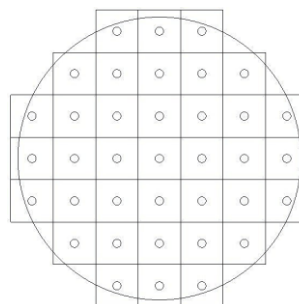


Fig. 1. Arranjo com 37 cilindros dispostos dentro da mancha circular. O arranjo foi uniforme, no qual a distância entre cilindros

vizinhos foi constante e igual a 3.3 cm. Os retículos e o perímetro da mancha não fazem parte da geometria, mas serviram como referência para se obter o arranjo.

O estudo de convergência de malha seguiu a metodologia de Celik et al. (2008), também denominada *Grid Convergence Index* (GCI). O GCI consiste em calcular o erro de discretização de uma simulação causado pelo grau de refinamento da malha, e verifica se a discretização produz a convergência das variáveis de interesse para os dados medidos. Para a validação, três malhas foram testadas, sendo que a malha grossa apresentou 459,412 elementos, a malha intermediária apresentou 773,296 elementos, e a malha fina apresentou 2,137,736 elementos (em todas as malhas, os elementos eram hexaédricos). As variáveis utilizadas no GCI foram a velocidade longitudinal (componente u) obtida na linha de centro da mancha e a velocidade transversal (componente v) obtida na lateral da mancha. O passo-a-passo do cálculo do GCI encontra-se detalhado em Celik et al. (2008).

As seguintes condições de contorno foram aplicadas: a entrada do canal foi definida como *velocity-inlet*, com velocidade inicial $U_0 = 9.5$ cm/s, a saída do canal foi definida como *pressure-outlet*, e as paredes e os cilindros da mancha foram definidos como *no-slip wall*. As simulações foram realizadas com o código Fluent® v.14.5.7, que utiliza o método dos volumes finitos na discretização do domínio. O escoamento foi considerado permanente, e a solução *steady-state* foi obtida utilizando-se as equações *Reynolds-Averaged-Navier-Stokes* (RANS) e o modelo de turbulência $k-\epsilon$. A mancha de vegetação foi representada por um arranjo de cilindros (obstáculos), através do qual o escoamento foi simulado. Por isso, os coeficientes do modelo $k-\epsilon$ (Wilcox, 1994) não foram alterados na simulação, ao contrário, por exemplo, de Reis et al. (2020), que calcularam o termo de atrito relativo à resistência da vegetação.

3. Resultados

3.1. Validação e GCI

Os perfis de velocidade obtidos para as três malhas encontram-se na Fig. 2. Inicialmente, a montante da mancha ($x/D < 0$), o escoamento permaneceu inalterado, com $u/U_0 = 1$. Imediatamente antes da mancha ($-0.5 < x/D < 0$), a velocidade longitudinal sofreu uma redução para $u/U_0 = 0.9$, ao mesmo tempo em que a velocidade transversal v/U_0 apresentou um leve aumento. Na esteira a jusante da mancha ($1 < x/D < 5$), a desaceleração do escoamento resultou em $u/U_0 = 0.6$, uma redução de 40% em U_0 . Já na lateral da mancha, houve um pico de $v/U_0 \approx 0.2$, decorrente do desvio acelerado do escoamento na lateral da mancha. Após a esteira ($x/D > 5$), a velocidade longitudinal foi se recuperando gradativamente a $u/U_0 \approx 0.8$, enquanto v/U_0 retornou a zero.

É possível observar que, na região em $0 < x/D < 2$, os dados simulados subestimaram os dados medidos (Fig. 2), o que pode ser atribuído ao arranjo dos cilindros.

Nas simulações, uma fileira de cilindros foi posicionada exatamente na linha de centro da mancha, de modo que o perfil de u/U_0 capturou a esteira do último cilindro, onde é sabido que a velocidade atinge seu menor valor, já na saída da mancha ($x/D = 1$). Já na mancha experimental de Zong e Nepf (2011), devido aos cilindros terem sido posicionados de forma escalonada, as medições de velocidade ocorreram entre os cilindros, e por isso os valores de u/U_0 foram maiores. Mesmo assim, todos os perfis simulados apresentaram boa concordância com os dados medidos, apresentando comportamento similar de redução e recuperação da velocidade. Destaca-se que a malha fina apresentou melhor ajuste em $x/D > 15$ (curva em laranja).

Note que, para u/U_0 , o erro médio (a média dos erros percentuais entre o valor simulado e o valor medido) diminuiu gradativamente de 4.13% para 2.74%, conforme o refinamento foi aumentado (Tabela 1). Para v/U_0 , a mesma tendência não foi observada, pois a malha intermediária apresentou o maior erro médio, o que pode ser justificado pelo fato de v/U_0 ter alcançado valores baixos (os dados medidos variaram entre $v/U_0 = 0$ a 0.1), o que pode ter exacerbado o erro percentual.

Os valores de GCI ficaram abaixo de 1%, tanto entre a malha grossa e a intermediária, como entre a malha intermediária e a fina. Isso indica que as malhas produziram resultados similares, ou seja, o erro de discretização foi baixo. Consequentemente, considerando que as curvas estão bem ajustadas aos dados medidos, é justificável utilizar a malha grossa em futuras simulações, pois ela demanda menos processamento computacional.

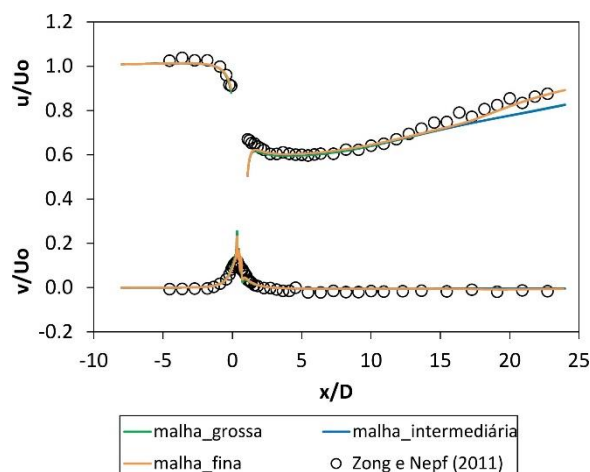


Fig. 2. Perfis da velocidade longitudinal (u) normalizada com U_0 , obtidos na linha de centro da mancha, e perfis da velocidade transversal (v) normalizada com U_0 , obtidos na borda lateral da mancha, ao longo do comprimento (x) normalizado com D . A mancha se localiza em $x/D = 0$ a 1.

Tabela 1. Erro médio entre simulação e experimento, para cada malha.

	Erro médio (%)	
	u/U_0	v/U_0
Malha grossa	4.13	66.22
Malha intermediária	3.51	74.83
Malha fina	2.74	62.11

3.2. Campo de velocidades

O campo de velocidades formado na mancha de vegetação é mostrado na Fig. 3, para o caso da malha fina. Os cilindros produziram uma esteira de velocidades reduzidas dentro e a jusante da mancha, nas regiões em verde e azul, devido à resistência imposta por cada cilindro ao escoamento. Por outro lado, a velocidade foi aumentada ao redor da mancha, nas regiões em laranja, indicando que parte do escoamento foi desviado lateralmente.

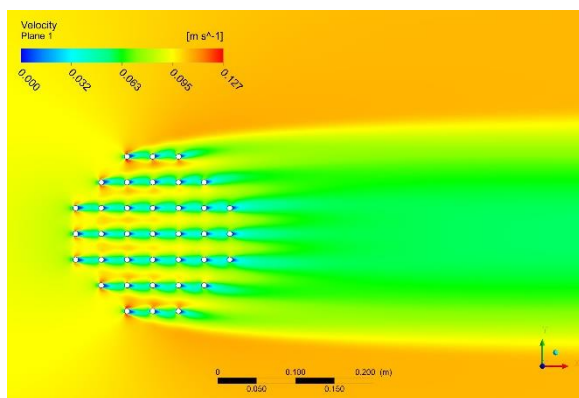


Fig. 3. Campo de velocidades na mancha de vegetação, para o caso da malha fina. O sentido do escoamento é da esquerda para a direita.

4. Conclusões

Este estudo apresentou a validação em CFD de um modelo de mancha de vegetação em escala de laboratório, para a qual as seguintes etapas foram seguidas: definição da geometria (arranjo de cilindros), estudo de convergência de malha e, por fim, configuração do *solver*. Três malhas, com diferentes discretizações, foram testadas nas simulações, e todas mostraram um bom ajuste com os dados medidos. O GCI entre as malhas ficou abaixo de 1%, o que sugere que o uso da malha grossa é adequado para este modelo.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo nº 88882.458516/2019-01.

Referências

- Bouma, T.J., van Duren, L.A., Temmerman, S., Claverie, T., Blanco-Garcia, A., Ysebaert, T., e Herman, P.M.J. (2007). Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures: combining field, flume and modelling experiments. *Continental Shelf Research*, (27), 1020-1045.
- Celik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., Coleman, H., e Raad, P.E. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, (130).
- D'Ippolito, A., Calomino, F., Alfonsi, G., e Lauria, A. (2021). Flow resistance in open channel due to vegetation at reach scale: a review. *Water*, (13), 116.
- De Lima, P.H.S., Janzen, J.G., e Nepf, H. (2015). Flow patterns around two neighboring patches of emergent vegetation and possible implications for deposition and vegetation growth. *Environmental Fluid Mechanics*, (15), 881-898.
- Green, J.C. (2006). Effect of macrophyte spatial variability on channel resistance. *Advances in Water Resources*, (29), 426-438.
- Kleeberg, A., Köhler, J., Sukhodolova, T., e Sukhodolov, A. (2010). Effects of aquatic macrophytes on organic matter deposition, resuspension and phosphorus entrainment in a lowland river. *Freshwater Biology*, (55), 326-345.
- Maji, S., Hanmaiahgari, P.R., Balachandar, R., Pu, J.H., Ricardo, A.M., e Ferreira, R.M.L. (2020). A review on hydrodynamics of free surface flows in emergent vegetated channels. *Water*, (12), 1218.
- Nepf, H. (2012). Hydrodynamics of vegetated channels. *Journal of Hydraulic Research*, (50), 262-279.
- Reis, R., Pires-Silva, A.A., Fortes, C.J. and Suzuki, T. (2020). Experiences with SWASH on modelling wave propagation over vegetation: comparisons with lab and field data. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 20(2), 145-150.
- Sukhodolov, A., e Sukhodolova, T. (2005). Morphodynamics and hydraulics of vegetated river reaches: a case study on the Müggelspree in Germany. In: Parker, G., Garcia, M., Rhoads, B. (Eds.) *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 229-236.
- Van Katwijk, M.M., Bos, A.R., Hermus, D.C.R., e Suykerbuyk, W. (2010). Sediment modification by seagrass beds: muddification and sandification induced by plant cover and environmental conditions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, (89), 175-181.
- Wilcox, D.C. (1994). Turbulence Modeling For CFD. DCW Industries Inc., La Cañada, California.
- Yamasaki, T.N., De Lima, P.H.S., Silva, D.F. Preza, C.G.A., Janzen, J.G., e Nepf, H. (2019). From patch to channel scale: the evolution of emergent vegetation in a channel. *Advances in Water Resources*, (129): 131-145.
- Zong, L., e Nepf, H. (2011). Vortex development behind a finite porous obstruction in a channel. *Journal of Fluid Mechanics*, (691), 368-391.