

Modelagem da vegetação aquática em estudos de dinâmica dos fluidos computacional

Modeling aquatic vegetation in computational fluid dynamics studies

Tais Natsumi Yamasaki¹ , Paulo Henrique Silva de Lima¹ ,
Manoel Lucas Machado Xavier¹ , Johannes Gérson Janzen^{1*} 

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi apresentar, por meio da técnica dinâmica dos fluidos computacional (CFD), dois métodos utilizados nas representações conceitual e física da vegetação em meio aquático: meio poroso e elementos geométricos simplificados. Três estudos de caso, que incluem um *wetland* flutuante e manchas de vegetação, exemplificam a aplicação dos métodos, mostrando suas vantagens e desvantagens. Nas etapas da geometria e da malha, a representação da vegetação como meio poroso é mais simples, prática e rápida do que a da vegetação como elementos geométricos simplificados. Porém, na parte da modelagem das equações, o método do meio poroso não consegue capturar os processos de mistura no interior da vegetação, enquanto o método dos elementos geométricos simplificados consegue.

Palavras-chave: dinâmica dos fluidos computacional; meio poroso; elementos geométricos simplificados; mancha de vegetação; *wetland*.

ABSTRACT

The goal of this work was to present, through computation fluid dynamics (CFD), two methods used in the conceptual and physical representation of vegetation in aquatic environments: the porous media approach and the simplified geometric elements. Three case studies, including a floating wetland and patches of vegetation, exemplify how the methods are applied, showing their advantages and disadvantages. At the geometry and meshing stage, the porous media approach shows to be simpler, faster, and more practical than the simplified geometric elements. However, in the equation modeling, the porous media approach is not able to capture the mixing processes inside the vegetation, while the simplified geometric elements method can capture those processes.

Keywords: computation fluid dynamics; porous media; simplified geometric elements; vegetation patch; wetland.

INTRODUÇÃO

A vegetação aquática desempenha papel fundamental no funcionamento e na manutenção de ambientes naturais, como sistemas fluviais, regiões costeiras e pântanos. Dentre as suas funções ecológicas, podem-se citar: a capacidade de remover, reter e degradar nutrientes, compostos orgânicos e inorgânicos e materiais tóxicos, melhorando a qualidade da água; o suporte no abrigo de outros organismos, promovendo a criação de *habitats* e o desenvolvimento da cadeia alimentar; e as habilidades de amortecer o impacto de ondas e de aumentar a estabilidade de margens e encostas, protegendo o ambiente da erosão hídrica (NEPF, 2012). Estima-se que esses e outros serviços desempenhados pela vegetação aquática no mundo tenham o valor econômico de mais de 10 trilhões de dólares por ano (COSTANZA *et al.*, 1997).

As interações que ocorrem entre a vegetação e o escoamento, e que resultam nos serviços mencionados acima, são um dos objetos de estudo da Mecânica de Fluidos Ambiental (mais conhecida, em inglês, como *Environmental Fluid*

Mechanics). Por serem dinâmicas e complexas, as interações podem ser estudadas sob diversas escalas e para diferentes fins. Na pequena escala de uma folha, estudos têm investigado como ocorrem os processos de transferência de massa, responsáveis pelo fluxo de nutrientes e gases (ABDELRHMAN, 2007; NEPF, 2012; LEI, NEPF, 2016). Na escala intermediária, manchas de vegetação têm sido estudadas na compreensão da hidráulica de canais (SUKHODOLOV; SUKHODOLOV, 2005; GREEN, 2006), na retenção e disposição de sedimentos (COTTON *et al.*, 2006; BOUMA *et al.*, 2007; KLEEBERG *et al.*, 2010) e na evolução da vegetação (TEMMERMAN *et al.*, 2007; VANDENBRUWAENE *et al.*, 2011; KONDZIOLKA; NEPF, 2014; DE LIMA; JANZEN; NEPF, 2015). Em grandes escalas, como a de paisagens vegetadas, estudos têm investigado os efeitos da vegetação na morfologia de regiões alagadas (LARSEN; HARVEY, 2011) e de rios (TAL; PAOLA, 2007).

Além dos tradicionais estudos de campo e em laboratório, a abordagem numérica utilizando a fluidodinâmica computacional, também conhecida como

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – Campo Grande (MS), Brasil.

*Autor correspondente: johannes.janzen@ufms.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio do Programa Print-UFMS-CAPES e do Programa Nacional de Pós-Doutorado (PNPD); e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Recebido: 16/07/2018 – **Aceito:** 04/11/2019 – **Reg. ABES:** 20180052

dinâmica dos fluidos computacional (CFD), tem se mostrado um campo promissor na área de escoamentos vegetados. A CFD é uma técnica capaz de representar, conceitual ou fisicamente, as interações vegetação-escoamento (WILSON; STOESSER; BATES, 2005), e estudos recentes têm sido publicados nessa área (STOESSER; KIM; DIPLAS, 2010; MARJORIBANKS *et al.*, 2014; DE LIMA; JANZEN; NEPE, 2015; CHANG; CONSTANTINESCU, 2015; XAVIER; JANZEN; NEPE, 2018). Dependendo do custo computacional e do nível de detalhamento desejado, a vegetação pode ser representada de forma mais simples, como um coeficiente de rugosidade (GOLZAR, 2015), ou de forma detalhada, com seus galhos, ramos e folhas (BOOTHROYD *et al.*, 2016). Neste artigo são apresentados dois métodos para representar a vegetação em modelos CFD, suas vantagens e deficiências, e como eles foram aplicados em estudos de caso.

METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vegetação como meio poroso

Uma das formas de se representar a vegetação em CFD é pelo meio poroso, no qual a resistência oferecida pela vegetação ao escoamento é considerada no termo fonte das equações discretizadas de Navier-Stokes (Equação 1):

$$\frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + S_{M,i} \quad (1)$$

Em que:

i ou $j = 1, 2$ ou 3 ;

x_1, x_2 e x_3 = as direções longitudinal (x), transversal (y) e vertical (z), respectivamente;
 u_1, u_2 e u_3 = as componentes correspondentes da velocidade média ($u_1 = u, u_2 = v, e u_3 = w$);

$\overline{u'_i u'_j}$ = a componente das tensões de Reynolds, em que u' denota a parte flutuante da velocidade;

p = a pressão;

ρ = a massa específica do fluido;

ν = a viscosidade cinemática do fluido;

$S_{M,i}$ = o termo fonte ou sumidouro.

Para os estudos de caso, há somente um sumidouro de quantidade de movimento, o qual é tipicamente igual a (Equação 2):

$$S_{M,i} = -\frac{\mu}{K_{perm}} u_i \quad (2)$$

Em que:

K_{perm} = permeabilidade da vegetação (m^2);

μ = viscosidade dinâmica ($kg \cdot m^{-1} s^{-1}$);

u_i = velocidade ($m \cdot s^{-1}$).

O termo sumidouro cria perda de pressão no meio poroso proporcional à velocidade. A permeabilidade K_{perm} precisa ser calibrada para cada tipo de vegetação, ou com modelos de laboratório.

O desenho da vegetação como meio poroso é simples, prático e rápido, uma vez que a morfologia da vegetação (raízes, caules e folhas) não é levada em consideração e a forma geométrica do meio poroso é igual à da própria mancha de vegetação. Conseqüentemente, o processo de geração da malha também é

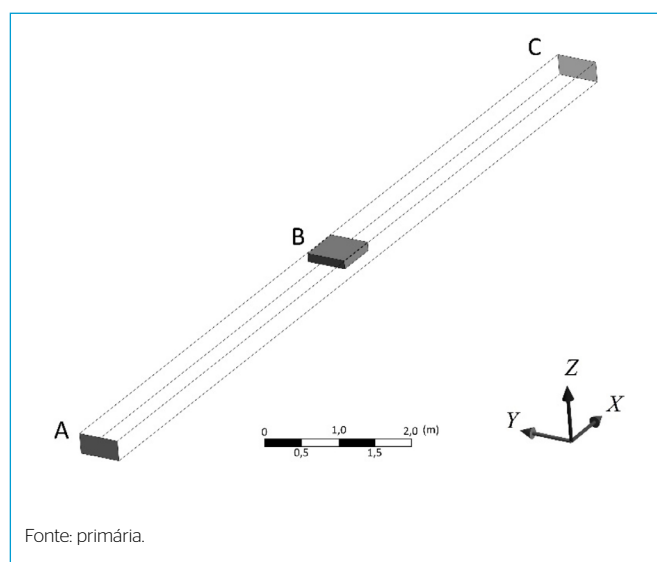
simples, prático e rápido, possibilitando a criação de malhas de boa qualidade por meio de geradores automáticos (YAMASAKI; JANZEN; LIMA, 2017).

Para ilustrar as vantagens e desvantagens de se representar a vegetação como meio poroso, assim como o seu passo a passo na modelagem CFD, são apresentados a seguir dois estudos de caso. O primeiro refere-se a um *wetland* flutuante. O domínio do modelo computacional tem 12,62 m de comprimento, 0,6 m de largura e 0,3 m de altura (Figura 1). A vegetação tem 0,62 m de comprimento, 0,58 m de largura e 0,125 m de espessura. O modelo baseia-se no estudo experimental de Downing-Kunz e Stacey (2012), que realizaram medições de velocidade e turbulência em um canal retangular, na presença de macrófitas flutuando na superfície da água.

Na entrada, o escoamento foi considerado uniforme, com velocidade constante e igual a $5,5 \text{ cm} \cdot s^{-1}$. Na saída, a pressão estática foi definida como sendo 0 Pa. Nas paredes, foi aplicada a condição de não deslizamento. Finalmente, na superfície livre, que está no topo do canal, foi aplicada a condição de simetria, com gradiente zero para as variáveis normais à superfície. O valor de K_{perm} foi variado entre 10^{-20} m^2 e 10^{-4} m^2 , para ajustar os dados computacionais aos dados experimentais. A porosidade da vegetação, definida como a razão entre o volume de vazios e o volume total, foi de 95%.

Com relação ao fenômeno físico, o escoamento diverge imediatamente a montante da vegetação, aumentando a magnitude da velocidade vertical em direção ao fundo do canal. Na direção principal do escoamento, a velocidade aumenta no início da vegetação, mas se estabiliza a um valor constante após percorrer aproximadamente 70% do comprimento da vegetação, ou seja, 0,434 m a jusante do início da vegetação. Além disso, a vegetação ocasiona perda de quantidade de movimento no escoamento, fazendo com que a velocidade não retorne ao valor inicial na saída do canal. O mesmo comportamento foi observado por Downing-Kunz e Stacey (2012).

A Figura 2 apresenta os perfis verticais da velocidade na direção do escoamento ($u = f(z)$) para três permeabilidades. Os perfis verticais, ao longo da profundidade, foram obtidos 70% a jusante do início da vegetação (na direção x),



Fonte: primária.

Figura 1 - Geometria usada para o modelo computacional, visando reproduzir os experimentos de Downing-Kunz e Stacey (2012). A representa a entrada, C representa a saída e B representa a vegetação. O fundo do canal foi colocado na origem do eixo vertical, que aumenta para cima.

ainda dentro da zona porosa. O melhor ajuste foi obtido para $K_{perm} = 10^{-6} \text{ m}^2$ (curva de traço e ponto). Note-se que, apesar de existir um distanciamento entre valores experimentais e computacionais no seio do escoamento ($0,8 \leq z/h_c \leq 1,4$), o comportamento da velocidade ao longo da profundidade é bem descrito, havendo bom ajuste no fundo do canal e no interior da vegetação.

O segundo estudo de caso consiste na simulação do escoamento em um canal vegetado que tem um grupo de manchas de vegetação emergente (não submersas). No domínio computacional, o canal retangular apresenta 25,3 m de comprimento e 4,4 m de largura, e cada mancha circular de vegetação tem diâmetro igual a 22 cm (Figura 3A). As 54 manchas foram aleatoriamente inseridas no canal, mantendo-se a uma distância de 3,08 m da entrada e de 6,82 m da saída. O escoamento chega no canal a uma velocidade de entrada, U_0 , igual a $9,5 \text{ cm.s}^{-1}$. Considerando-se que a vegetação é emergente, os principais efeitos das interações com o escoamento ocorrem no plano horizontal e, portanto, o modelo pode ser representado em 2-D, assumindo profundidade unitária (DE LIMA; JANZEN; NEPF, 2015).

Assim como no primeiro estudo de caso, a malha foi gerada de forma automática (Figura 3B). Os volumes de controle ficaram menores nas regiões de alto gradiente de velocidade, como na interface entre a vegetação e a água (Figura 3C). A permeabilidade do meio poroso foi calibrada com dados experimentais de Zong e Nepf (2012), obtendo-se o melhor ajuste para $K_{perm} = 1/70.000 \text{ m}^2$ (Figura 4).

A Figura 5 mostra o campo resultante de velocidades no canal após a simulação. O padrão inicial do escoamento foi modificado pelas manchas, originando regiões de velocidade reduzida (menor que U_0) na esteira das manchas (regiões em azul) e regiões de alta velocidade (maior que U_0) nas laterais das manchas (regiões em laranja e vermelho). Isso está em acordo com estudos experimentais, que mostraram que o escoamento desviado ao redor de uma mancha é acelerado e parte do escoamento que atravessa a mancha perde velocidade (ZONG; NEPF, 2012). Há também o efeito das interações entre as manchas, conhecidas como *feedbacks* (DE LIMA; JANZEN; NEPF, 2015). Dependendo da proximidade, as manchas podem interagir sobre o escoamento, criando regiões diferentes de

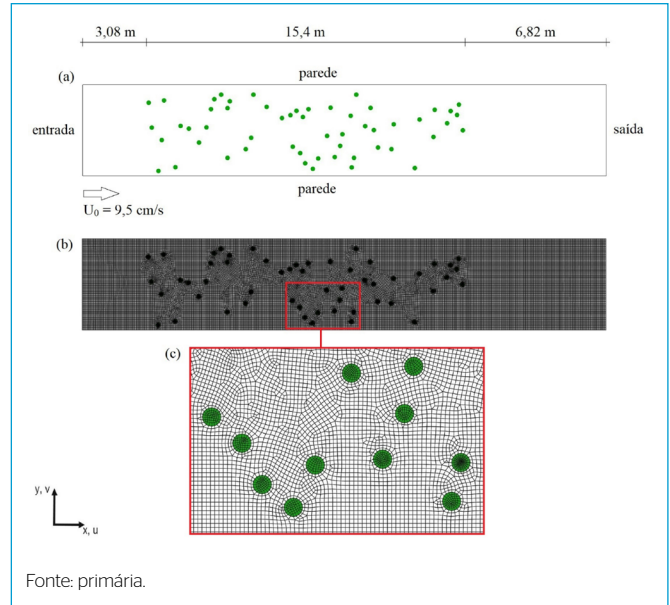


Figura 3 - (A) Geometria e (B) malha típica de um canal com 54 manchas de vegetação emergente representadas como meio poroso, em vista superior. (C) Detalhe da malha dentro e ao redor das manchas de vegetação.

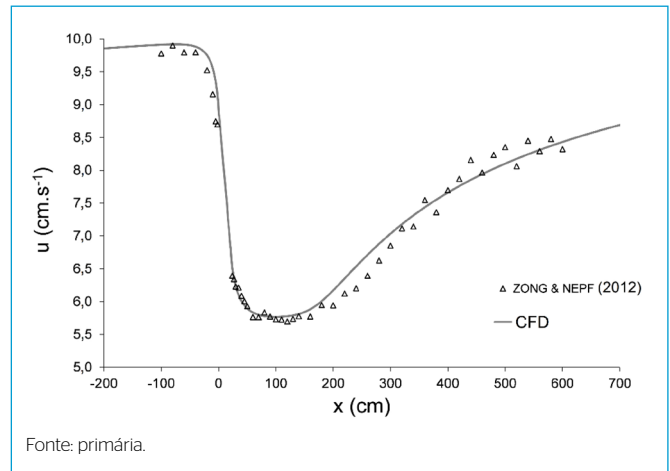


Figura 4 - Curva de calibração da permeabilidade para uma mancha de vegetação. Os dados mostram a velocidade u na linha de centro da mancha. O erro máximo entre os dados numéricos e os experimentais foi de 6%.

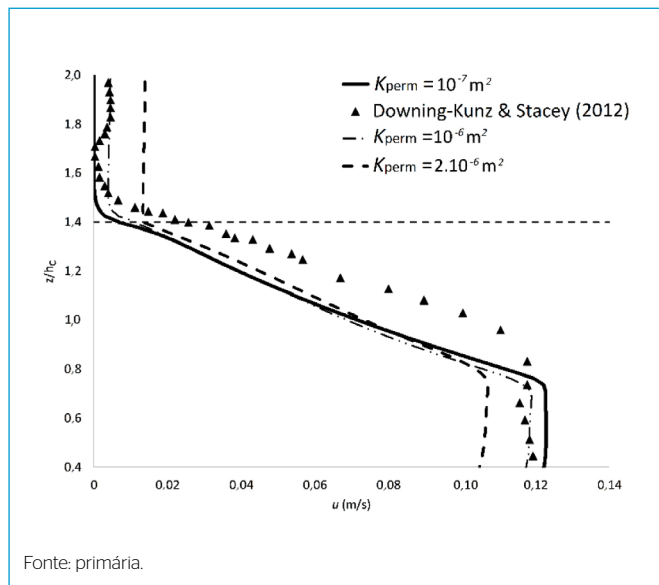


Figura 2 - Comparação entre os dados experimentais e computacionais, onde z é a distância vertical, h_c é a espessura da zona porosa, e u é a velocidade na direção do escoamento. A linha tracejada indica o fundo da zona porosa.

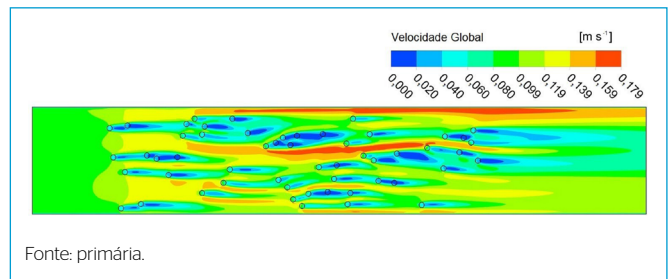


Figura 5 - Campo de velocidades no canal vegetado. As 54 manchas circulares de vegetação foram representadas como meios porosos. Elas modificaram o padrão inicial do escoamento, gerando regiões de velocidade reduzida (em azul) e velocidade elevada (em laranja e vermelho).

velocidade reduzida, quando comparadas com uma mancha isolada. No todo, esse resultado pode ser utilizado para prever o crescimento de nova vegetação no canal que ocorreria nas regiões de baixa velocidade (KONDZIOŁKA; NEPF, 2014).

Além da hidrodinâmica de grande escala que ocorre ao redor da mancha de vegetação, e cuja representação pode ser obtida por meio do modelo poroso, é importante destacar que as manchas de vegetação também produzem hidrodinâmica de pequena escala (na escala de caules no interior da mancha) que induz processos de mistura transversal e longitudinal (TSAVDARIS; MITCHELL; WILLIAMS, 2013). Dentre os processos de mistura transversal, destacam-se a difusão turbulenta e a dispersão mecânica (NEPF, 1999), enquanto, entre os processos longitudinais, destacam-se o aprisionamento de vórtices e a dispersão da esteira secundária (cisalhamento diferencial) ao redor dos “cilindros” da vegetação (raízes e caules) (WHITE; NEPF, 2003). Nesse caso, o modelo poroso não é capaz de capturar a hidrodinâmica de pequena escala.

Para melhor representar a vegetação, estudos têm configurado a zona porosa com parâmetros que levam em consideração a turbulência adicional causada pelos “cilindros” (SONNENWALD; GUYMER; STOVIN *et al.*, 2018). Os resultados iniciais são promissores, sendo aparentemente possível estimar valores adequados para cada tipo de vegetação. Portanto, espera-se que, no futuro, seja possível modelar os efeitos da turbulência utilizando o meio poroso.

Vegetação como elementos geométricos simplificados

A segunda forma de representar a vegetação em simulações CFD é desenhar a sua estrutura, não apenas definindo a borda (como no caso das manchas porosas), mas também o seu interior. Para isso, muitos estudos têm utilizado uma abordagem simplificada: os caules são representados por cilindros, que, quando agrupados apropriadamente, formam manchas de vegetação (NICOLLE; EAMES, 2011; CHANG; CONSTANTINESCU, 2015; DE LIMA; JANZEN; NEPF, 2015). A quantidade de cilindros obedece a parâmetros de vegetações reais, como a fração de volume sólido (ϕ), que indica o quão densa é a vegetação. Por exemplo, a vegetação em manguezais costuma apresentar valores de ϕ entre 0,001 e 0,02 (LEONARD; LUTHER, 1995). Outros parâmetros importantes são o diâmetro da mancha (D) e a área frontal por unidade de volume (a) (NEPF, 2012). O uso de elementos geométricos simplificados espelha-se em estudos experimentais, importantes na validação e calibração de modelos numéricos, que também representaram a vegetação por meio de cilindros. Por exemplo, estudos de Chen *et al.* (2012) e Kim, Kimura e Shimizu (2015) utilizaram cilindros rígidos para representar manchas de vegetação emergente; Ghisalberti e Nepf (2006) e Lei e Nepf (2016) utilizaram hastes flexíveis para representar a vegetação submersa. Há pesquisadores que defendem que a vegetação deve ser desenhada mais detalhadamente, incluindo a forma dos caules, dos ramos e das folhas (BOOTHROYD *et al.*, 2016), mas a geometria e a malha se tornariam complexas e dispendiosas, dificultando a utilização dessa abordagem para escalas de manchas de vegetação. Quanto à distribuição dos cilindros no interior da mancha, testes preliminares realizados neste estudo mostraram que não existe diferença significativa entre utilizar um arranjo regular de cilindros ou distribuí-los de forma aleatória, contanto que o parâmetro aD , conhecido como bloqueio do escoamento (ou “*flow blockage*”), seja similar entre o modelo experimental e o computacional.

Ao contrário do modelo poroso, que emprega o termo fonte, a força de arrasto que ocorre nos cilindros é responsável pela perda da quantidade de movimento na mancha de vegetação. Usualmente, são utilizados modelos de turbulência que conseguem reproduzir os escoamentos médio e turbulento

(modelos RANS — *Reynolds Average Navier Stokes*), apesar de não predizerem bem os detalhes quantitativos da turbulência, como as escalas de cisalhamento e da esteira (DEFINA; BIXIO, 2005). Eventualmente, o coeficiente de arrasto (C_D) precisa ser calibrado. Em poucas situações são empregados modelos mais robustos, como o *Large Eddy Simulation*, permitindo a obtenção quantitativa da turbulência (STOESSER *et al.*, 2009).

O estudo de caso que ilustra o uso de elementos geométricos simplificados para representar a vegetação baseou-se no estudo experimental de Zong e Nepf (2012). O modelo computacional consiste no canal retangular de 10 m de comprimento e 1,2 m de largura, que tem mancha circular de vegetação de diâmetro $D = 22$ cm, posicionada 3 m a jusante da entrada e no centro da largura do canal (Figura 6A). A mancha tem 35 cilindros rígidos com diâmetro de 0,6 cm, produzindo fração de volume sólido (ϕ) aproximadamente igual a 0,03. A área frontal por unidade de volume (a) é de $0,06 \text{ cm}^{-1}$. A velocidade de entrada do escoamento, U_0 , é de $9,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. O modelo foi considerado bidimensional, isto é, com profundidade unitária.

Para simplificar a malha computacional, os cilindros foram posicionados em arranjo quadrado, em vez do arranjo circular utilizado por Zong e Nepf (2012). A justificativa para tal procedimento está nos resultados experimentais obtidos por Vandenbruwaene *et al.* (2011), que estudaram o escoamento no entorno de manchas de vegetação circulares e quadradas, com a mesma densidade de cilindros, e verificaram que a forma da mancha não influenciou o comportamento do escoamento. Note-se que desenhar uma mancha de vegetação com elementos geométricos, ainda que simplificados, já se torna mais complexo e dispendioso do que desenhar a mesma mancha no modelo de meio poroso.

A malha gerada ao redor dos cilindros requer bom refinamento, para que seja possível obter informações do escoamento e da turbulência no interior da mancha. No modelo, a malha foi gerada com a estrutura *O-grid* ao redor de cada cilindro (Figura 6B). A estrutura *O-grid* é utilizada para manter a qualidade de elementos hexaédricos em fronteiras curvas, como é o caso dos cilindros que compõem a mancha de vegetação. Dessa maneira, nessas regiões críticas,

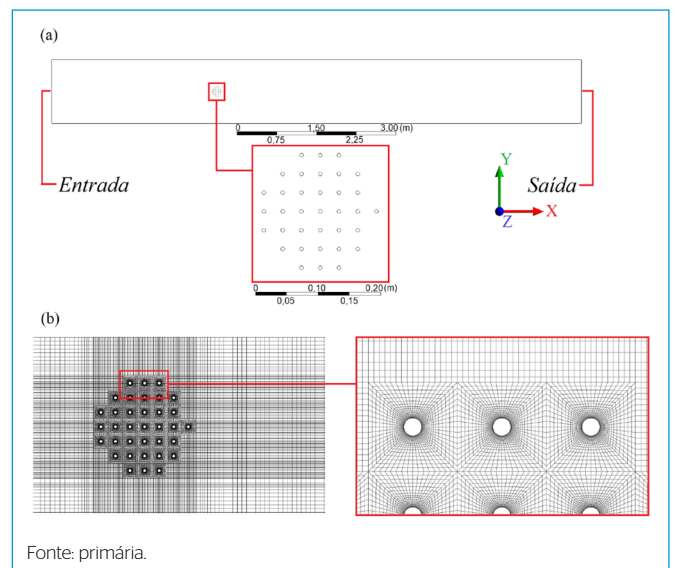


Figura 6 - (A) Geometria do canal com uma mancha de vegetação e (B) detalhamento da malha ao redor e no interior de uma mancha de vegetação emergente representada como elemento geométrico simplificado.

a malha não prejudica a convergência das simulações. Porém, devido ao refinamento, essa malha demandou mais tempo e ajustes, quando comparada com a malha gerada automaticamente para o modelo poroso.

O resultado da simulação mostra que a mancha de vegetação alterou o escoamento de duas formas principais: uma parte do escoamento foi desviada e acelerada nas laterais da mancha e outra atravessou a mancha, perdendo quantidade de movimento devido à resistência dos cilindros (Figura 7). Conseqüentemente, as laterais da mancha tornaram-se regiões de velocidade elevada (regiões em verde-claro) e atrás da mancha formou-se uma região de velocidade reduzida, denominada esteira estacionária (regiões em azul-escuro). A alteração no escoamento uniforme começou a ocorrer a uma distância $L_0 \approx 1,4D$ a montante da mancha, consistente com a ordem de grandeza obtida experimentalmente (ROMINGER; NEPF, 2011; ZONG; NEPF, 2012). A esteira estacionária perdura por um determinado comprimento (L_1), no qual a velocidade reduzida permanece constante; após L_1 , o escoamento começa a se recuperar (aumentar) e a se tornar completamente desenvolvido novamente. O comprimento da esteira estacionária (L_1) pode ser calculado empiricamente (CHEN *et al.*, 2012) e depende do coeficiente de bloqueio de escoamento ($C_D aD$), devido ao arrasto proporcionado pelos cilindros que compõem o arranjo da mancha. Para manchas com baixo bloqueio de escoamento ($CDaD < 4$), que se aplicam ao estudo de caso, o comprimento da esteira estacionária é igual a Equação 3:

$$\frac{L_1}{D} = 2,5 \left[\frac{8 - C_D aD}{C_D aD} \right] \quad (3)$$

A Equação 3 prediz que $L_1/D \approx 4,5$, em termos adimensionais, para a mancha experimental de $C_D aD = 2,86$. A simulação numérica apresentou $L_1/D = 4,1$, que foi medido diretamente, e mostra boa concordância com a Equação 3.

Chen *et al.* (2012) também formularam a seguinte relação empírica para a velocidade atrás da mancha (U_e), conforme Equação 4:

$$\frac{U_e}{U_0} \approx 1 - 0,21 C_D aD \quad (4)$$

A Equação 4 prediz $U_e/U_0 \approx 0,4$ para o bloqueio do escoamento da mancha experimental. Esse valor é próximo ao obtido pela simulação, que apresentou

$U_e/U_0 = 0,6$. Além disso, não há regiões de recirculação a jusante da mancha, o que também está em acordo com Chen *et al.* (2012).

Os perfis das componentes da velocidade (u e v) e da energia cinética turbulenta (k) foram obtidos a partir da simulação com cilindros (Figura 8). A mancha foi posicionada entre $x = 0$ e $x = 0,22$ m, com o centro da mancha em $y = 0$. O perfil da velocidade longitudinal u , obtido ao longo da linha de centro da mancha ($y = 0$), mostra que a velocidade começa a decrescer antes de atingi-la, especificamente $0,3$ m ($L_0 \approx 1,4D$) a montante da mancha (Figura 8A). Esse perfil também deixa mais clara, por meio de um ponto de inflexão, a determinação da distância L_1 , a partir da qual a velocidade começa a aumentar e se aproximar de U_0 novamente, como foi discutido na Figura 7. Nesse caso, o ponto de inflexão ocorre em $x = 1,12$ m, ou seja, descontando-se o diâmetro da mancha, o comprimento da esteira é de $L_1 = 0,9$ m, ou $L_1/D = 4,1$. A simulação se ajustou bem aos dados experimentais.

Na lateral da mancha ($y = D/2$), o perfil de velocidade v foi obtido ao longo do canal (Figura 8B). A velocidade v é nula para quase todo o campo de escoamento longe da mancha, mas tem sua intensidade aumentada na lateral da mancha, devido ao desvio acelerado do escoamento nessa região. O estudo de Zong e Nepf (2012) apresentou $v_{max} \approx 1,2$ cm.s⁻¹, enquanto a simulação obteve $v_{max} = 1,6$ cm.s⁻¹, demonstrando o bom ajuste dos dados.

Outras informações relativas ao modelo, como a energia cinética turbulenta, também podem ser importantes. Chang e Constantinescu (2015), por exemplo, argumentam que a disponibilidade de nutrientes é diretamente afetada nas regiões de alta turbulência. Follett e Nepf (2012), ao estudarem o efeito de uma mancha de vegetação no sedimento de fundo de um canal, verificaram que o sedimento erodido no interior da mancha estabeleceu melhor correlação com a energia cinética turbulenta do que com a velocidade do escoamento, e que, portanto, a turbulência pode ser um melhor indicador da movimentação de sedimento. Porém, informações sobre quantidades turbulentas são mais difíceis de se reproduzir com precisão, uma vez que dependem da escolha dos modelos de turbulência e também de calibração de suas constantes empíricas. Para efeitos de comparação, a energia cinética turbulenta, k , foi plotada na linha de centro da mancha (Figura 8C). A simulação não pôde capturar com precisão o pico da energia cinética turbulenta (o experimento apresentou pico de 4 cm²/s²

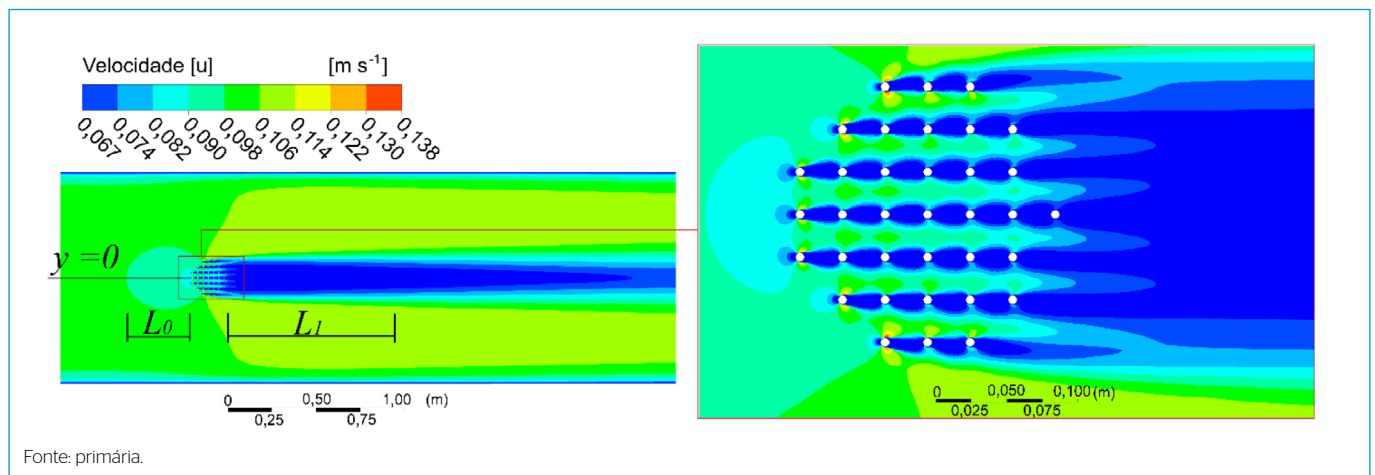


Figura 7 - Campo de escoamento ao redor e no interior de uma mancha de vegetação representada por cilindros. Dados obtidos na linha de centro da mancha ($y = 0$) foram utilizados na comparação com estudos experimentais.

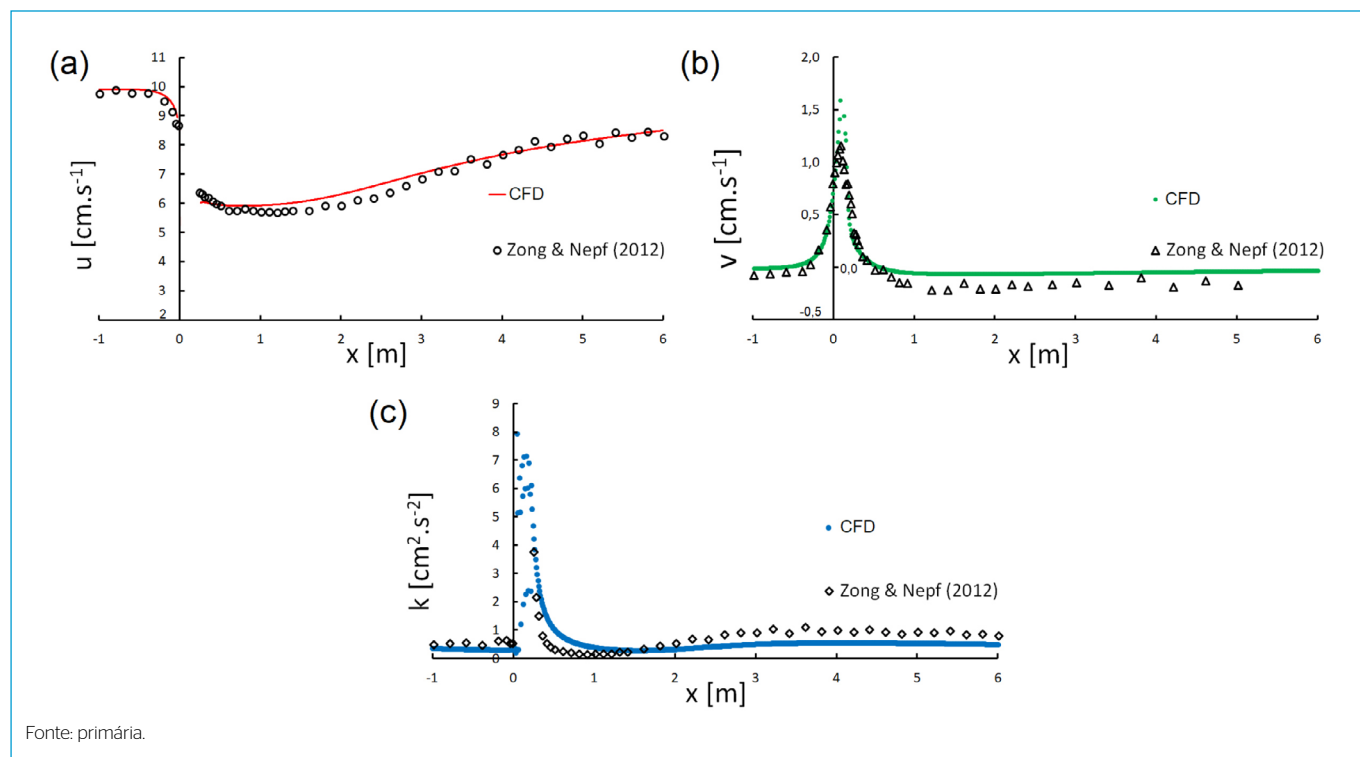


Figura 8 - Comparação entre os resultados computacionais e os de Zong e Nepf (2012). (A) Perfil da velocidade u obtido na linha de centro da mancha ($y = 0$); (B) perfil da velocidade v obtido na linha lateral da mancha ($y = D/2$); (C) perfil da energia cinética turbulenta k obtido na linha de centro da mancha ($y = 0$).

dentro da mancha, enquanto o modelo numérico obteve $8 \text{ cm}^2/\text{s}^2$), mas, ainda assim, os valores foram obtidos com a mesma ordem de grandeza e na mesma região em que é esperado aumento de k .

CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os métodos do meio poroso e dos elementos geométricos simplificados que têm sido utilizados para representar a vegetação aquática em estudos de CFD, os quais visam compreender a influência da vegetação no escoamento. Foram apresentados três estudos de caso que demonstraram a complexidade da interação escoamento-vegetação e indicaram alguns avanços necessários nessa área da Mecânica dos Fluidos Ambiental. Na parte da geometria e da malha, a representação da vegetação como meio poroso é mais simples, prática e rápida do que a representação da vegetação como elementos

geométricos simplificados. Na parte da modelagem das equações, o método do meio poroso não consegue capturar os processos de mistura no interior da vegetação, ainda que avanços recentes tenham possibilitado resolver parte do problema. Por sua vez, o método dos elementos geométricos simplificados consegue capturar os processos de mistura no interior da vegetação. O detalhamento dessa informação depende do modelo de turbulência utilizado.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Yamasaki, T. N.: Investigação, Validação, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Lima, P. H. S.: Investigação, Validação, Escrita – Primeira Redação. Xavier, M. L. M.: Investigação, Validação, Escrita – Primeira Redação. Janzen, J. G.: Obtenção de Financiamento, Supervisão, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- ABDELRHMAN, M.A. Modeling coupling between eelgrass *Zostera marina* and water flow. *Marine Ecology Progress Series*, v. 338, p. 81-96, 2007.
- BOOTHROYD, R.J.; HARDY, R.J.; WARBURTON, J.; MARJORIBANKS, T.I. The importance of accurately representing submerged vegetation morphology in the numerical prediction of complex river flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 41, n. 4, p. 567-576, 2016. <https://doi.org/10.1002/esp.3871>
- BOUMA, T.J.; VAN DUREN, L.A.; TEMMERMAN, S.; CLAVERIE, T.; BLANCO-GARCIA, A.; YSEBAERT, T.; HERMAN, P.M.J. Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures: Combining field, flume and modelling experiments. *Continental Shelf Research*, v. 27, n. 8, p. 1020-1045, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.12.019>
- CHANG, K.; CONSTANTINESCU, G. Numerical investigation of flow and turbulence structure through and around a circular array of rigid cylinders.

- Journal of Fluid Mechanics*, v. 776, p. 161-199, 2015. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.321>
- CHEN, Z.; ORTIZ, A.; ZONG, L.; NEPF, H.M. The wake structure behind a porous obstruction and its implications for deposition near a finite patch of emergent vegetation. *Water Resources Research*, v. 48, n. 9, 2012. <https://doi.org/10.1029/2012WR012224>
- COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R.V.; PARUELO, J.; RASKIN, R.G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, v. 387, p. 253-260, 1997. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- COTTON, J.A.; WHARTON, G.; BASS, J.A.B.; HEPPELL, C.M.; WOTTON, C.S. The effects of seasonal changes to in-stream vegetation cover on patterns of flow and accumulation of sediment. *Geomorphology*, v. 77, n. 3-4, p. 320-334, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.010>
- DE LIMA, P.H.S.; JANZEN, J.G.; NEPF, H.M. Flow patterns around two neighboring patches of emergent vegetation and possible implications for deposition and vegetation growth. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 15, n. 4, p. 881-898, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10652-015-9395-2>
- DEFINA, A.; BIXIO, A.C. Mean flow and turbulence in vegetated open channel flow. *Water Resources Research*, v. 41, n. 7, W07006, 2005. <https://doi.org/10.1029/2004WR003475>
- DOWNING-KUNZ, M.A.; STACEY, M.T. Observations of mean and turbulent flow structure in a free-floating macrophyte root canopy. *Limnology and Oceanography - Fluids and Environments*, v. 2, n. 1, p. 67-79, 2012. <https://doi.org/10.1215/21573689-1631580>
- FOLLETT, E.M.; NEPF, H.M. Sediment patterns near a model patch of reedy emergent vegetation. *Geomorphology*, v. 179, p. 141-151, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.006>
- GHISALBERTI, M.; NEPF, H.M. The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 6, p. 277-301, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10652-006-0002-4>
- GOLZAR, M. A brief review of pond residence times studies. In: ANNUAL POSTGRADUATE RESEARCH STUDENT CONFERENCE, 2015. *Anais [...]*. Sheffield, 2015. p. 32-37.
- GREEN, J.C. Effect of macrophyte spatial variability on channel resistance. *Advances in Water Resources*, v. 29, n. 3, p. 426-438, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.05.010>
- KIM, H.S.; KIMURA, I.; SHIMIZU, Y. Bed morphological changes around a finite patch of vegetation. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 40, n. 3, p. 375-388, 2015. <https://doi.org/10.1002/esp.3639>
- KLEEBOEG, A.; KÖHLER, J.; SUKHODOLOVA, T.; SUKHODOLOV, A. Effects of aquatic macrophytes on organic matter deposition, resuspension and phosphorus entrainment in a lowland river. *Freshwater Biology*, v. 55, n. 2, p. 326-345, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02277.x>
- KONDZIOLKA, J.M.; NEPF, H.M. Vegetation wakes and wake interaction shaping aquatic landscape evolution. *Limnology and Oceanography - Fluids & Environments*, v. 4, n. 1, p. 106-119, 2014. <https://doi.org/10.1215/21573689-2846314>
- LARSEN, L.G.; HARVEY, J.W. Modeling of hydroecological feedbacks predicts distinct classes of landscape pattern, process, and restoration potential in shallow aquatic ecosystems. *Geomorphology*, v. 126, n. 3-4, p. 279-296, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.03.015>
- LEI, J.; NEPF, H.M. Impact of current speed on mass flux to a model flexible seagrass blade. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 121, n. 7, p. 4763-4776, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JC011826>
- LEONARD, L.A.; LUTHER, M.E. Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies. *Limnology and Oceanography*, v. 40, n. 8, p. 1474-1484, 1995. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1474>
- MARJORIBANKS, T.I.; HARDY, R.J.; LANE, S.N.; PARSONS, D.R. High-resolution numerical modelling of flow-vegetation interactions. *Journal of Hydraulic Research*, v. 52, n. 6, p. 775-793, 2014. <https://doi.org/10.1080/00221686.2014.948502>
- NEPF, H.M. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research*, v. 35, n. 2, p. 479-489, 1999. <https://doi.org/10.1029/1998WR900069>
- NEPF, H.M. Hydrodynamics of vegetated channels. *Journal of Hydraulic Research*, v. 50, n. 3, p. 262-279, 2012. <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.696559>
- NICOLLE, A.; EAMES, I. Numerical study of flow through and around a circular array of cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 679, p. 1-31, 2011. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.77>
- ROMINGER, J.T.; NEPF, H.M. Flow adjustment and interior flow associated with a rectangular porous obstruction. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 680, p. 636-659, 2011. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.199>
- SONNENWALD, F.; GUYMER, I.; STOVIN, V. Computational fluid dynamics modelling of residence times in vegetated stormwater ponds. *Water Management*, v. 171, n. 2, p. 76-86, 2018. <https://doi.org/10.1680/jwama.16.00117>
- STOESSER, T.; KIM, S.J.; DIPLAS, P. Turbulent flow through idealized emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 136, n. 12, p. 1003-1017, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY1943-7900.0000153](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY1943-7900.0000153)
- STOESSER, T.; SALVADOR, G.P.; RODI, W.; DIPLAS, P. Large Eddy Simulation of turbulent flow through submerged vegetation. *Transport in Porous Media*, v. 78, p. 347-365, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11242-009-9371-8>
- SUKHODOLOV, A.; SUKHODOLOV, T. Morphodynamics and hydraulics of vegetated river reaches: a case study on the Müggelspree in Germany. In: PARKER, G.; GARCIA, M.; RHOADS, B. (org.). *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. Londres: Taylor & Francis Group, 2005. p. 229-236.
- TAL, M.; PAOLA, C. Dynamic single-thread channels maintained by the interaction of flow and vegetation. *Geomorphology*, v. 35, n. 4, p. 347-350, 2007. <https://doi.org/10.1130/G23260A1>
- TEMMERMAN, S.; BOUMA, T.J.; VAN DE KOPPEL, J.; VAN DER WAL, D.; DE VRIES, M.B.; HERMAN, P.M.J. Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape. *Geology*, v. 35, n. 7, p. 631-634, 2007. <https://doi.org/10.1130/G23502A1>
- TSAVDARIS, A.; MITCHELL, S.; WILLIAMS, J. Use of CFD to model emergent vegetation in detention ponds. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 8, n. 7, p. 495-503, 2013.
- VANDENBRUWAENE, W.; TEMMERMAN, S.; BOUMA, T.J.; KLAASSEN, P.C.; DE VRIES, M.B.; CALLAGHAN, D.P.; VAN STEEG, P.; DEKKER, F.; VAN DUREN, L.A.; MARTINI, E.; BALKE, T.; BIERMANS, G.; SCHOELYNCK, J.; MEIRE, P. Flow interaction with dynamic vegetation patches: Implications for biogeomorphic evolution of a tidal landscape. *Journal of Geophysical Research*, v. 116, n. F1, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JF001788>

WHITE, B.; NEPF, H.M. Scalar transport in random cylinder arrays at moderate Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 487, p. 43-79, 2003. <https://doi.org/10.1017/S0022112003004579>

WILSON, C.A.M.E.; STOESSER, T.; BATES, P.D. Modelling of open channel flow through vegetation. In: BATES, P.D.; LANE, S.N.; FERGUSON, R.I. (org.). *Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics*. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2005. p. 395-428.

XAVIER, M.L.M.; JANZEN, J.G.; NEPF, H.M. Numerical modeling study to compare the nutrient removal potential of different floating treatment

island configurations in a stormwater pond. *Ecological Engineering*, v. 111, p. 78-84, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.201711.022>

YAMASAKI, T.N.; JANZEN, J.G.; LIMA, P.H.S. Representando a vegetação na modelagem computacional de *wetlands*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS, 3., 2017. *Anais [..]*. Campo Grande: UCDB, 2017. p. 303-311.

ZONG, L.; NEPF, H.M. Vortex development behind a finite porous obstruction in a channel. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 691, p. 368-391, 2012. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.479>

