

## XII-101 - VALIDAÇÃO DE MODELO CFD PARA INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO NO INTERIOR DE *WETLANDS* CONSTRUÍDAS DE ESCOAMENTO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

**Emily Elizabeth Rengers<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela West Virginia University. Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

**Johannes Gérson Janzen<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Pós-Doutor em Mecânica dos Fluidos Ambientais pela Massachusetts Institute of Technology. Professor Adjunto da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET). Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PGTA) – Campus Universitário – Campo Grande - MS - CEP: 79070-900 - Brasil - Tel: +55 (67) 3345-7392 - e-mail: [emilyrengers1@gmail.com](mailto:emilyrengers1@gmail.com).

### RESUMO

O objetivo deste trabalho é validar um modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para investigação do comportamento hidrodinâmico de uma *wetland* construído de escoamento subsuperficial horizontal (CW-FHS). Para a validação do modelo CFD foi realizado um experimento de traçador em uma CW-FHS laboratorial. Para a modelagem CFD foi utilizado o software ANSYS CFX. Foi obtida uma boa concordância entre dados experimentais e computacionais. Por conseguinte, é possível utilizar o modelo CFD para investigar o escoamento através de CW-FHSs.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Wetland* construído, tempo de residência médio, Fluidodinâmica Computacional, modelagem computacional, traçador.

### INTRODUÇÃO

Um *wetland* construído de fluxo horizontal subsuperficial (CW-FHS) pode ser utilizado para tratamento e reutilização de água cinza domiciliar (Silva et al., 2014). CW-FHSs removem os poluentes através de processos dependentes do tempo, incluindo a sedimentação, a absorção pelas plantas, e reduções químicas ou biológicas (Kadlec e Wallace, 2009; Konnerup et al., 2009; Vymazal e Kröpfelová, 2009; Paulo et al., 2009; Haberl et al., 2003). Quanto mais tempo os poluentes permanecem no interior de um CW-FHS, maior é a quantidade de poluentes removidos. Por isso, é importante projetar os CW-FHSs de tal forma que possuam regime de escoamentos pistonado, porque este conduz a um maior tempo de residência para todas as parcelas de água que adentram o sistema e, conseqüentemente, a redução máxima do poluente. Considerando fluxo de pistão, cada parcela da água que entra no sistema alcança a saída em um tempo nominal,  $\tau$ , igual a:

$$\tau = V/Q \quad \text{equação (1)}$$

onde  $V$  representa o volume do líquido no sistema e  $Q$  é a vazão volumétrica através do sistema. O tempo nominal  $\tau$  é o tempo requerido para uma troca completa do volume dentro de um *wetland* (Persson et al., 1999; Kadlec e Knight, 1996). Na prática, é impossível obter o fluxo pistonado. Cada parcela da água possui um tempo de residência diferente influenciado pelas propriedades físicas (e.g. a densidade da água), de escoamento (e.g. vazão) e geométricas (e.g. comprimento do *wetland*) de um *wetland*. Isto é atribuído ao complexo comportamento hidrodinâmico existente no interior de *wetlands*, principalmente os curtos circuitos, as regiões de mistura e as zonas mortas ou de recirculação. Conseqüentemente, o cálculo da distribuição do tempo de residência (RTD) para cada parcela da água é importante, porque ele é usado para projetar as eficiências hidráulicas e de qualidade da água dos CW-FHSs.

Embora diversos estudos computacionais tenham investigado as RTDs de *wetlands*, há ainda grande incerteza na validade de sua aplicação por pelo menos três razões (Fan et al., 2008). Primeiro, a maioria dos estudos usa

uma aproximação do tipo “caixa preta”, observando somente aquilo que acontece na entrada e na saída do sistema, sendo incapaz de explicar o comportamento hidrodinâmico no interior das *wetlands*, tais como curtos circuitos, regiões de mistura e zonas de recirculação (Kadlec e Wallace, 2009). Além disso, os estudos computacionais têm utilizado aproximações uni e bidimensionais para investigar os padrões da velocidade e as RTDs no interior das *wetlands* subsuperficiais (Rizzo, 2014; Fournel, 2013; Morvannou, 2013; Fan et al., 2008, 2010; Kjellin et al., 2006; Worman e Kronnas, 2005; Jenkins e Greenway, 2005; Koskiahio, 2003; Persson et al., 1999; Walker, 1998). Esses modelos não conseguem capturar os padrões tridimensionais extremamente complexos que podem ser a causa mais significativa e única para a diminuição da eficiência hidráulica de uma *wetland*. Neste caso, é requerido a utilização de ferramentas de modelagem tridimensional. A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma ferramenta que possa fornecer a informação detalhada do fluxo no interior das *wetlands* e das RTDs. O CFD é uma aproximação poderosa porque possui baixo custo, é escalável, e pode ser usado para diversas configurações de projeto (Fan et al., 2008). Finalmente, nós não temos conhecimento de estudo que tenha validado sua modelagem computacional tridimensional de uma CW-FHS com dados experimentais.

Consequentemente, a fim de beneficiar o projeto de *wetlands* subsuperficiais construídos para o tratamento de águas residuais domiciliar e o uso da ferramenta CFD para simular os processos de transporte que ocorrem no interior de *wetlands* construídos, o objetivo deste trabalho é validar um modelo CFD com dados experimentais de laboratório, comparando as curvas de RTD e os índices hidráulicos obtidos a partir das curvas de RTD.

## MÉTODO EXPERIMENTAL

A Figura 1 mostra a *wetland* construída de escoamento subsuperficial horizontal (CW-FHS) investigada no presente estudo. As dimensões são: 0,98 m de comprimento x 0,28 m de largura x 0,55 m de altura e uma declividade de 0,6 graus. O interior é preenchido com cascalho fino ( $D_{60} = 6$  mm). Na entrada e na saída, há tubos do tipo *manifold* de 32 mm. A fração de vazios ( $\epsilon$ ), definida como a relação entre o volume de vazios e o volume do sistema com brita, é de 0,46. Para investigação do comportamento hidrodinâmico foi utilizado um ensaio de traçador seguindo as recomendações da AWWA Research Foundation (1996). Uma massa de  $M_0 = 5460$  mg de NaCl foi injetada por aproximadamente 1% do tempo de residência nominal no tubo de entrada da CW-FHS. A concentração  $C$  de NaCl foi monitorada na saída do sistema, sendo possível obter uma curva da distribuição do tempo de residência hidráulico (RTD). O experimento foi considerado completo após 3,5 vezes o tempo de retenção hidráulico nominal, tendo uma duração de 193 minutos. A recuperação do traçador foi acima de 90 %. O escoamento foi permanente. A vazão foi de  $Q = 1.25$  L/min.

## MÉTODO CFD

A modelagem CFD foi realizada usando o pacote comercial multi-propósito de ANSYS CFX. No modelo CFD as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento são resolvidas numericamente. Neste estudo, a modelagem consistiu de duas etapas. Na primeira etapa, as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento foram calculadas considerando regime permanente e laminar, sendo possível obter o campo de velocidade no interior do sistema. A solução do campo de velocidade, foi utilizada para a segunda etapa. Nela um pulso de traçador foi inserido na entrada. A concentração do traçador foi monitorada na saída do sistema. Dessa forma foi possível obter a RTD do sistema. Como condições de contorno e de entrada foram adotadas as mesmas características apresentadas no “Método Experimental”. Ademais, na parede foi adotada a condição de não deslizamento. Na superfície, a condição de deslizamento. Na saída, foi especificada uma pressão de referência estática de 0 Pa. A Fig. 1 mostra as duas geometrias utilizadas na modelagem. O primeiro modelo tem uma geometria retangular (2D) de entrada e saída (Fig. 1a), enquanto que o segundo modelo tem uma entrada e saída cilíndrica (3D) (Fig. 1b). Uma geometria mais simples e outra mais complexa foi utilizada para verificar a possibilidade de simplificar futuras simulações com entradas e saídas mais simples de serem modeladas.

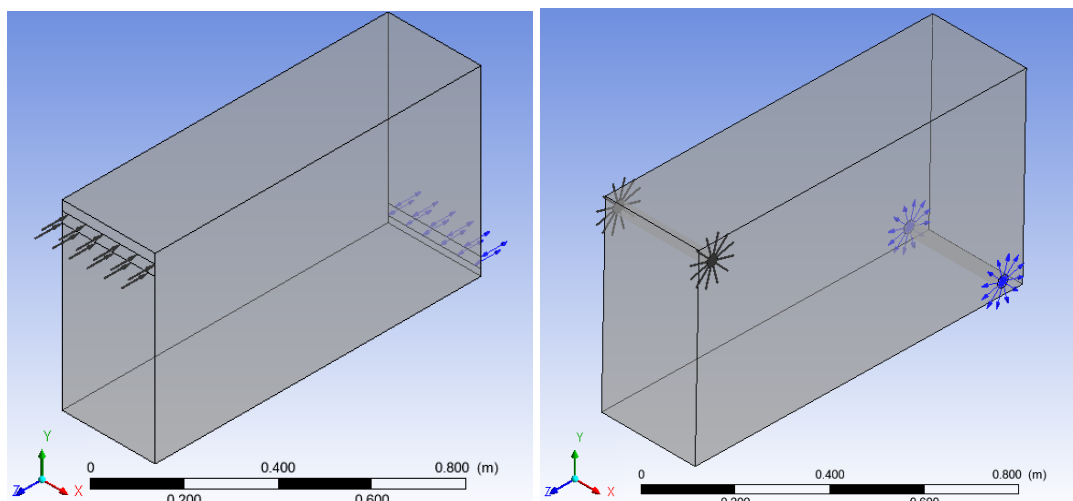


Figura 1: Geometria 2D entrada/saída retangular (a) e uma entrada/saída cilíndrica (b).

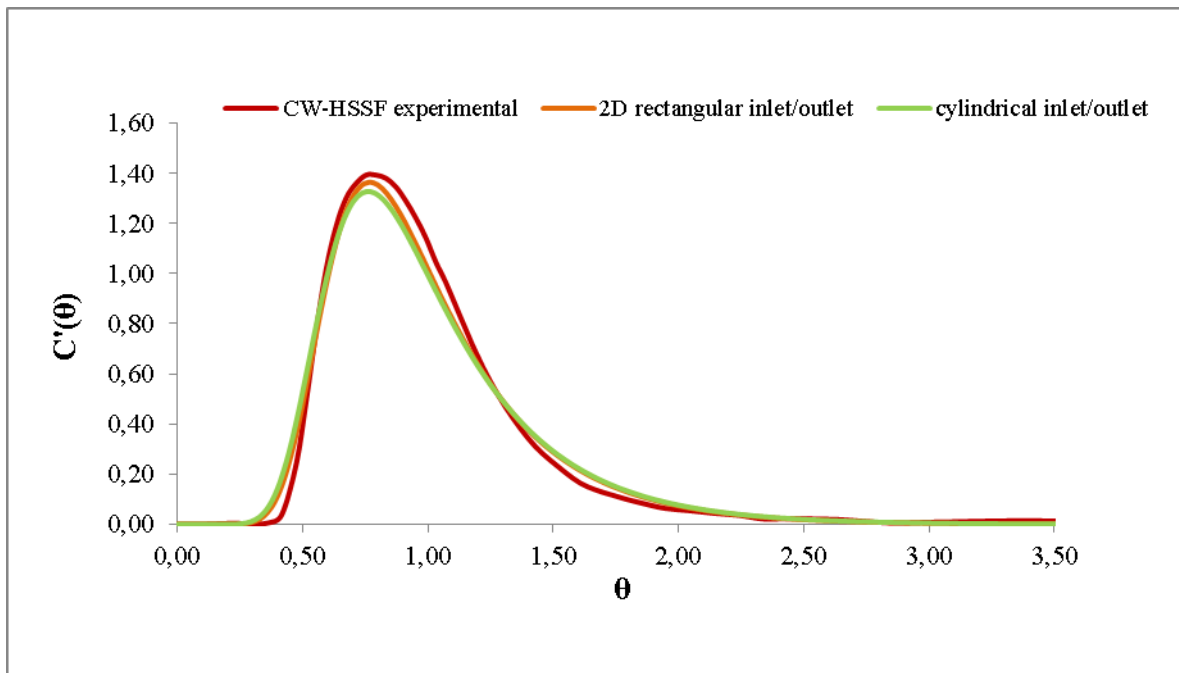
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra as RTDs experimental, CFD 2D e CFD 3D. É apresentada a concentração adimensional  $C^*(\theta) = QC/M_0$  e o tempo adimensional  $\theta = t/\tau_n$  (onde  $t$  é o tempo e  $\tau_n$  é o tempo de retenção hidráulico nominal). Os resultados são analisados qualitativamente por comparação das curvas de RTD e quantitativamente através da comparação dos índices hidráulicos calculados a partir das curvas de RTD (Tabela 2).

A avaliação qualitativa mostra que as curvas RTD simuladas através da ferramenta CFD possuem uma ótima concordância com a curva experimental. A RTD com entrada e saída 2D possui melhor concordância do que a RTD com entrada e saída 3D.

A partir das curvas RTD foi possível obter indicadores hidráulicos que permitem uma comparação quantitativa entre o método experimental e o método CFD. A Tabela 1 apresenta os indicadores de eficiência hidráulica obtidos no presente estudo. O primeiro indicador apresentado na Tabela 1 é o da eficiência volumétrica ( $e_v$ ) (Thackston et al., 1987), isto é, a razão do tempo de residência real ( $\tau$ ) e o tempo de residência nominal ( $\tau_n$ ):

$$e_v = \frac{\tau}{\tau_n} \quad \text{equação (2)}$$



**Figura 2: Curvas adimensionais de RTD.**

A equação 1 reflete o volume morto de uma *wetland* (Kadlec e Wallace, 2009). Os valores obtidos são altos ( $e_v > 0,9$ ), indicando o bom aproveitamento do sistema. A modelagem CFD produziu resultados similares e próximos ao experimental. O segundo indicador é o número equivalente de tanques de mistura completa em série ( $N$ ) (CSTR) (Fogler, 2005):

$$N = \frac{\tau_n^2}{\sigma^2} \quad \text{equação (3)}$$

onde  $\sigma^2$  é a variância da RTD. Os valores de  $N$  estão próximos de 6, indicando tendência ao fluxo pistonado. O fluxo pistonado acontece para  $N = 50$ . É importante ressaltar que o fluxo pistonado é o escoamento ideal para tratamento de água. É possível observar que o sistema com entrada e saída 3D apresentou uma melhor concordância com o valor de  $N$  experimental. O terceiro indicador é usualmente denominado de eficiência hidráulica ( $\lambda$ ) (Persson et al., 1999):

$$\lambda = e_v \left( 1 - \frac{1}{N} \right) \quad \text{equação (4)}$$

A equação 4 combina a razão de volume efetivo e o número de CSTR em série. Uma *wetland* é considerada otimizada conforme  $\lambda$  se aproxima de 1. Os valores experimentais e computacionais não estão muito distantes de 1, indicando que o sistema possui tendência a ser hidraulicamente eficiente. Os valores do modelo CFD foram iguais para os casos 2D e 3D e não muito distantes do valor experimental. Finalmente, foi calculado o índice que expressa a razão entre o tempo no qual ocorre o pico da concentração na saída ( $\tau_p$ ) e o tempo de residência hidráulico nominal:

$$\tau_p = \frac{\tau_p}{\tau_n} \quad \text{equação (5)}$$

Novamente é possível observar que os valores para os casos 2D e 3D são iguais e não muito distantes do valor experimental.

**Tabela 1: Indicadores hidráulicos usados para avaliação da eficiência hidráulica do sistema e realizar comparação entre os métodos experimental e CFD.**

	$e_v$	$N$	$\lambda$	$\tau_p$
Experimental	0,9	5,6	0,74	0,71
Entrada e saída 2D	1,0	6,3	0,84	0,76
Entrada e saída 3D	1,0	6,1	0,84	0,76

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Um modelo CFD foi aplicado a uma *wetland* construída subsuperficial horizontal. Para validação do modelo CFD, foi obtida uma curva RTD em uma *wetland* de laboratório. O formato e as características da RTD laboratorial indicam um sistema com poucas zonas mortas e com tendências ao escoamento ideal pistonado. O modelo CFD foi validado através da comparação das RTDs obtidas computacionalmente com os dados experimentais. Uma boa concordância foi obtida. Duas configurações de entrada e saída foram modeladas através de modelagem CFD (2D e 3D). A utilização da configuração 2D visa reduzir a complexidade da simulação. Boa concordância entre os resultados 2D e 3D foram obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION RESEARCH FOUNDATION. Tracer Studies in Water Treatment Facilities: A Protocol and Case Studies. U.S.A, 1996.
2. ANSYS Inc., CFX-Pre Users Guide Release 14.5, 2014.
3. FAN, L., HAI, R., WANG, W., LU, Z., YANG, Z. Application of computational fluid dynamic to model the hydraulic performance of subsurface flow wetlands. Journal of Environmental Sciences, v.20, p.1415–1422, 2008.
4. FOGLER, H.S. Elements of chemical reaction engineering fourth edition. Upper Saddle River, NJ: Person Education, Inc., 2005.
5. FOURNEL, J., FORQUET, N., MOLLE, P., GRASMICK, A. Modeling constructed wetlands with variably saturated vertical subsurface-flow for urban stormwater treatment. Ecological Engineering, v.55, p.1–8, 2013.
6. HABERL R., GREGO, S., LANGERGRABER, G., KADLEC, R.H., CICALINI, A.R., DIAS, S.M., NAVAIS, J.M., SUBERT, S., GERTH, A., THOMAS, H., HEBNER, A. Constructed wetlands for the treatment of organic pollutants. Journal of Soils and Sediments, v.3, n.2, p.109–124, 2003.
7. JENKINS, G.A., GREENWAY, M. The hydraulic efficiency of fringing versus banded vegetation in constructed wetlands. Ecological Engineering, v.25, n.1, p.61–72, 2005.
8. KADLEC, R.H.; KNIGHT, R.L. Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Raton, FL, p.893, 1996.
9. KADLEC, R.H., WALLACE, S.D. Treatment Wetlands, second ed. New York, New York, 2009.
10. KJELLIN, J., WÖRMAN, A., JOHANSSON, H., LINDAHL, A. Controlling factors for water residence time and flow patterns in Ekeby treatment wetland, Sweden. Advances in Water Resources, v.30, n.4, p.838–850, 2006.
11. KONNERUP, D., KOOTTATEP, T., BRIX, H. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia. Ecological Engineering, v.35, p.248–257, 2009.
12. KOSKIAHO, J. Flow velocity retardation and sediment retention in two constructed wetland ponds. Ecological Engineering, v.19, n.5, p.325–337, 2003.
13. MORVANNOU, A., FORQUET, N., VANCLOOSTER, M., MOLLE, P. Characterizing hydraulic properties of filter material of a vertical flow constructed wetland. Ecological Engineering, v.60, p.325–335, 2013.
14. PAULO, P.L., BEGOSSO, L., PANSONATO, N., SHRESTHA, R.R., BONCZ, M.A. Design and configuration criteria for wetland systems treating greywater. Water Science and Technology. v.60, n.8, p.2001–2007, 2009.
15. PERSSON, J., SOMES, N., WONG, T. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. Water Science and Technology, v.40, n.3, p.291–300, 1999.

16. RIZZO, A., LANGERGRABER, G., GALVÃO, A., BOANO, F., REVELLI, R., RIDOLFI, L. Modelling the response of laboratory horizontal flow constructed wetlands to unsteady organic loads with HYDRUS-CWM1. *Ecological Engineering*, v.68, p.209–213, 2014.
17. SILVA, J.B., MAGALHÃES FILHO, F.J.C., MENEZES, C.S., PAULO, P.L. Hidrodinâmica no Desenvolvimento de Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Cinza. 4 workshop – rede de pesquisa: Uso racional de água e eficiência energética em habitações de interesse social. Org: Silva, G.F., Leite, N.A. Editora da Universidade Federal de Sergipe cap. 9, p.203-220, 2014.
18. THACKSTON, E.L., SHIELDS, F.D., SCHOROEDER, P.R. Residence time distributions of shallow basins. *Journal of Environmental Engineering*, v.113, n.2, p.219-223, 1987.
19. VYMAZAL, J., KRÖPFELOVÁ, L. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience. *Science of the Total Environment*, v.407, p.3911-3922, 2014.
20. WALKER D.J. Modeling residence time in stormwater ponds. *Ecological Engineering*, v.10, n.3, p.247–262, 1998.
21. WORMAN A., KRONNAS V. Effect of pond shape and vegetation heterogeneity on flow and treatment performance of constructed wetlands. *Journal of Hydrology* v.301, p.123–138, 2005.