

3.01.04 - Engenharia Civil / Engenharia Hidráulica

MODELAGEM DA TRANSIÇÃO ENTRE ESCOAMENTOS DE SUPERFÍCIE LIVRE E CONDUTOS FORÇADOS

Vinícius N. Urbanek^{1*}, Johannes G. Janzen², José G. Vasconcelos³

1. Estudante do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da UFMS (PGTA-UFMS)
2. Professor da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia (FAENG-UFMS)/Orientador
3. Professor do Dept. of Civil Engineering, Auburn University/Co-orientador

Resumo

A transição entre escoamentos de superfície livre e condutos forçados tem sido objeto de interesse de pesquisas na área de modelagem hidráulica nas últimas décadas. Entretanto, a maioria dos estudos utiliza modelagem física ou computacional simplificada, não conseguindo determinar como escoamentos com cavidades de ar evoluem para bolsões de ar e qual é o volume de ar aprisionado. O entendimento desses fenômenos é importante para concepção e projeto de sistemas de esgotos pluviais e urbanos de modo mais eficiente e seguro. Neste estudo, o fenômeno de transição do regime livre para forçado em um conduto foi modelado usando a técnica Computational Fluid Dynamics (CFD). Para a validação da modelagem computacional foram utilizados os dados experimentais de Li e McCorquodale (2001). Os resultados obtidos permitiram um melhor entendimento da evolução de cavidades de ar para bolsões de ar e do volume de ar aprisionado.

Palavras-chave: CFD; Hidráulica; Simulação;

Apoio financeiro: CNPq

Trabalho selecionado para a JNIC: UFMS

Introdução

O escoamento em sistemas de drenagem é tipicamente classificado como de superfície livre. Estes sistemas são geralmente projetados para chuvas com período de retorno de 2 a 10 anos (MENEZES FILHO; COSTA, 2012). Chuvas com intensidade muito superior à de projeto podem levar à ocorrência do fenômeno da transição do regime de escoamento, com a rede de drenagem passando a operar pressurizada. Nessa situação, as variações de pressão no conduto podem acarretar o colapso da infraestrutura do sistema (BOUSSO; DAYNOU; FUAMBA, 2013), inundações no solo, ejeções de tampas de bueiro (LI; MCCORQUODALE, 1999) e fenômenos que se assemelham a gêiseres (SONG et al., 1983; GUO; SONG, 1990; VASCONCELOS; WRIGHT, 2011). Algumas dessas ocorrências estão relacionadas ao aprisionamento de bolsões de ar nas tubulações (VASCONCELOS; WRIGHT, 2011).

Uma vez que os sistemas de drenagem usualmente não são monitorados para registrar fenômenos de transientes rápidos e que estudos experimentais são forçados a realizar a idealizar o fenômeno, sendo capazes de reproduzir somente processos específicos, a modelagem matemática e numérica tem sido utilizada para avançar o entendimento na área. A maioria dos modelos numéricos é monofásica, somente considerando o escoamento da água. Recentemente modelos bifásicos também foram apresentados (e.g. VASCONCELOS; WRIGHT, 2009). Entretanto, esses modelos não determinam como escoamentos com cavidades de ar evoluem para bolsões de ar ou qual é o volume de ar aprisionado. O entendimento desses fenômenos é de grande ajuda para concepção e projeto de sistemas de esgotos pluviais e urbanos de modo mais eficiente e seguro (CHEN et al., 2013), podendo ser obtido através de modelagem bifásica com a técnica *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Neste estudo, o fenômeno de transição do regime livre para forçado em um conduto foi modelado usando CFD. Para a validação da modelagem computacional foram utilizados os dados experimentais de Li e McCorquodale (2001). Os resultados obtidos permitiram um melhor entendimento da evolução de cavidades de ar para bolsões de ar e do volume de ar aprisionado.

Metodologia

Para validar a modelagem CFD foram usados os dados de Li e McCorquodale (1999). Os autores usaram uma tubulação com 12,12 m de comprimento, diâmetro de 152 mm e declividade igual a 0,00515 (Figura 1). Essa geometria foi discretizada em 71675 elementos. Inicialmente a água escoou no regime livre e permanente através do conduto para profundidades relativas entre 0.50 e 0.85. A transição entre o escoamento livre e forçado foi gerada através do fechamento rápido da saída de jusante da tubulação. As condições de contorno empregadas encontram-se no quadro 1. A modelagem foi realizada usando o pacote estudantil do software ANSYS Workbench 18.2, o qual resolve numericamente, usando o método dos volumes finitos, as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, respectivamente, conforme segue:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), t é o tempo (s), \vec{v} é o vetor velocidade do escoamento (m/s), p é a média da pressão estática (Pa), $\bar{\tau}$ é a média do tensor cisalhante, e $\rho \vec{g}$ e \vec{F} são, respectivamente, a força gravitacional e as forças externas atuantes. Para “fechar” a Eq. 2 foi utilizado o modelo de turbulência k-epsilon.

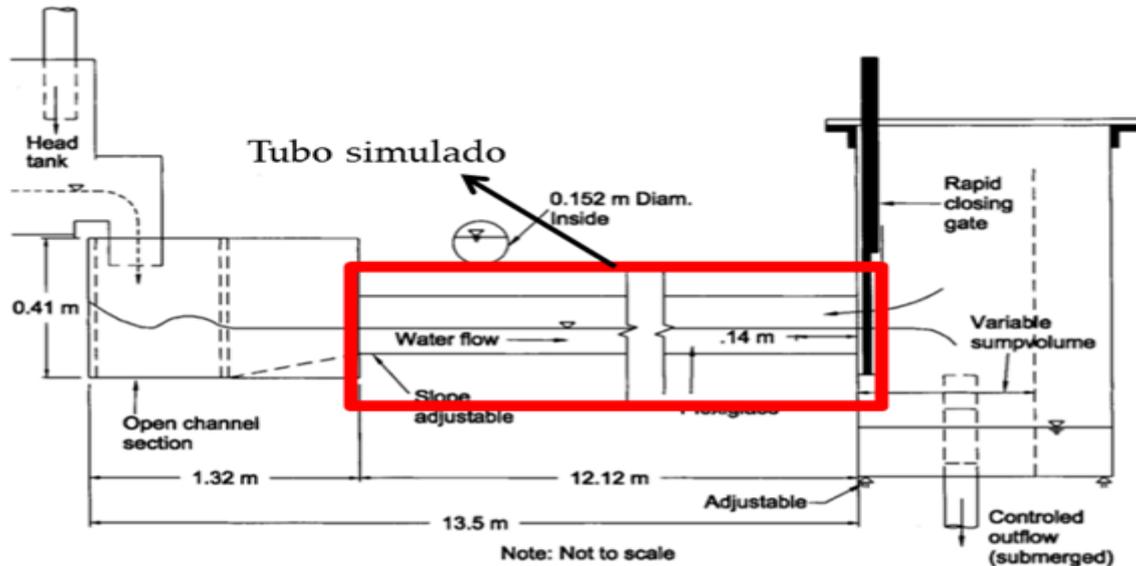


Figura 1 – Modelo físico a ser simulado computacionalmente (Li; McCorquodale, 1999)

Quadro 1 – Resumo das condições de contorno simuladas

Condição	Configuração
Gravidade	9,81 m/s ²
Modelo multifásico	<i>Volume of fluid</i>
Modelo de turbulência	k-epsilon
Ar	Massa específica: 1,225 kg/m ³ Viscosidade: 1,8 · 10 ⁻⁵ kg/m.s
Água	Massa específica: 998,2 kg/m ³ Viscosidade: 0,001003 kg/m.s
Entrada	Contorno: <i>pressure inlet</i> Profundidade relativa: 0,50; 0,70; 0,76*; 0,85 Intensidade turbulenta: 10%
Saída	Contorno: <i>mass flow outlet</i> Profundidade relativa: 0,50; 0,70; 0,76*; 0,85 Intensidade turbulenta: 10%
Discretização espacial	Pressão: <i>Body Force Weighted</i> Momento: <i>Upwind</i> de segunda ordem Fração volumétrica: Compressivo Energia cinética turbulenta: <i>Upwind</i> de segunda ordem Taxa de dissipação turbulenta: <i>Upwind</i> de segunda ordem
Passo de tempo	0,005 s
Tempo simulado	5,0 s

Resultados e Discussão

A validação do modelo computacional foi realizada a partir da comparação dos resultados de transientes de pressão da simulação com os resultados experimentais descritos por Li e McCorquodale (1999). O modelo simulado apresentou valores inferiores de pressão em relação aos dos resultados experimentais, porém o pico de pressão, apresentou um valor próximo ao experimental (Figura 2). Vale lembrar que o pico é um fator crítico,

pois possui o poder de gerar o maior dano à tubulação. Também foi verificada uma boa capacidade de previsão dos instantes dos picos de pressão. Diferenças encontradas entre resultados experimentais e computacionais podem ser explicadas devido ao fato de que o aparato do experimento é circular, enquanto o modelo empregado é bidimensional.

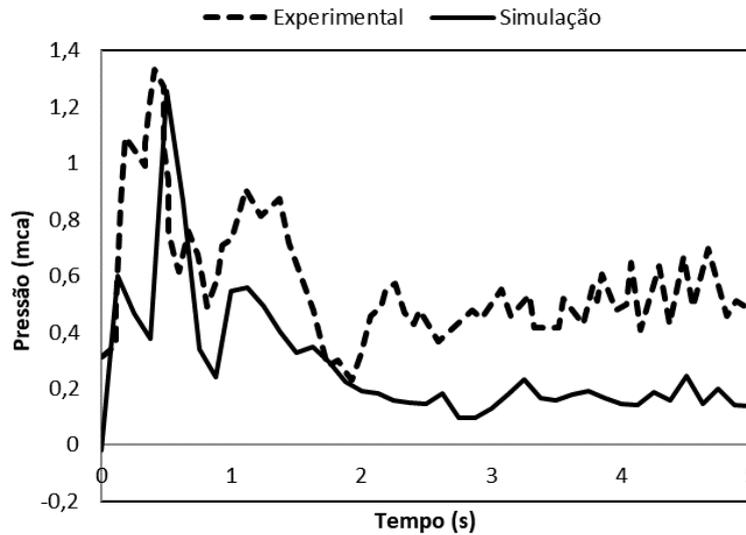


Figura 2 – Variação de pressão na simulação, comparado aos resultados experimentais

A figura 3 ilustra o aprisionamento de bolsões de ar na transição do escoamento de superfície livre para pressurizado, no instante de tempo de 2,0 s, para as diferentes profundidades relativas simuladas. Para melhor visualização dos dados, a escala vertical foi aumentada em 3x. É possível visualizar claramente a presença de dois regimes de escoamento distintos – superfície livre e conduto forçado – no duto, após o fechamento repentino da saída. Em um intervalo de poucos segundos após o bloqueio da saída, se verifica a formação de bolsões de ar no conduto, o que ocorre devido às instabilidades na interface ar-água provocadas pela variação brusca de pressão e recirculação do ar e da água. O desenvolvimento do escoamento e a movimentação do ressalto móvel formado pelo fechamento da saída na profundidade relativa de 0,70 e 0,76 apresentam um comportamento similar ao descrito pelas simulações apresentadas em Nomeritae, Bui e Daly (2018). A formação de diversos bolsões de ar ao longo do tempo da simulação também se encontra de acordo com o que se descreve dos resultados dos experimentos realizados nos trabalhos de Li e McCorquodale (1999, 2001), e que não era representado pelos modelos unidimensionais existentes, mencionados no trabalho supracitado.

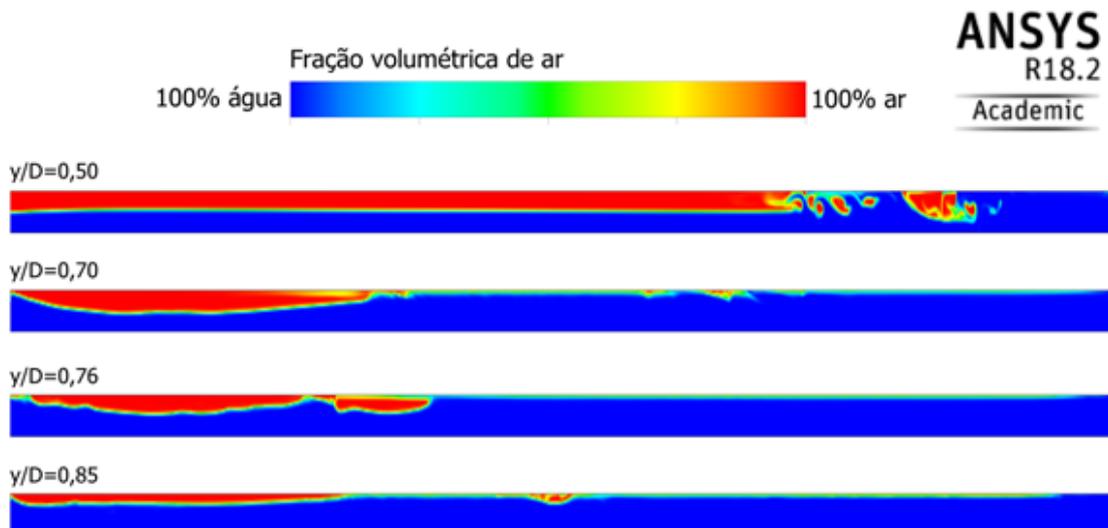


Figura 2 – Contornos de fração volumétrica de ar, em $t = 2,0$ s

Os resultados vão de encontro às conclusões dos experimentos de Li e McCorquodale (1999, 2001), que previam a ocorrência das instabilidades interfaciais seguidas da formação de bolsões para profundidades relativas do escoamento do canal superiores a 0,50. Para todas as profundidades simuladas dentro dessa faixa crítica, foram verificadas as instabilidades que levaram à formação dos bolsões de ar. Quanto maior a profundidade relativa, menor a quantidade de bolhas de ar formadas e maiores os seus volumes.

Conclusões

A modelagem dos fenômenos de transição entre escoamentos de superfície livre e condutos forçados apresenta diversos desafios a serem explorados nas pesquisas científicas. A realização deste trabalho mostrou que o emprego da Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma importante técnica para uma melhor compreensão deste fenômeno físico. Foi possível representar o fenômeno e verificar por meio das simulações a ocorrência das instabilidades interfaciais devido às tensões superficiais no escoamento para a faixa crítica prevista na literatura. O modelo simulado apresentou uma boa concordância em relação aos dados experimentais, especialmente em relação à representação do fenômeno físico e à predição dos instantes de ocorrência dos picos de pressão. As diferenças encontradas entre os resultados das simulações e dos experimentos podem ser explicadas devido às simplificações empregadas, sendo a principal delas a consideração de um modelo bidimensional para representar o escoamento em um canal circular. Pode-se observar a evolução das cavidades de ar para bolsões de ar. Quanto maior a profundidade relativa, menor a quantidade de bolhas de ar formadas e maiores os seus volumes. Propõe-se a realização, em trabalhos futuros, de simulações de uma maior gama de situações de escoamento, de modo a se obter maiores informações a respeito do comportamento dos escoamentos nessas condições, bem como também se verificar as condições de aprisionamento de bolsões de ar ocorridos, e sua relação com os transientes de pressão ocorridos durante o fenômeno.

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa Institucional de Internacionalização patrocinado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes-Print). Também agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio com a bolsa de Iniciação Científica oferecida pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências bibliográficas

- BOUSSO, Samba; DAYNOU, Mathurin; FUAMBA, Musandji. Numerical Modeling of Mixed Flows in Storm Water Systems: Critical Review of Literature. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 4, p.385-396, 2013.
- CHAUDHRY, Hanif. **Applied Hydraulic Transients**. 3. ed. New York: Springer, 2014.
- CHEN, Zhi et al. A CFD Modeling Approach for Municipal Sewer System Design Optimization to Minimize Emissions into Receiving Water Body. **Water Resources Management**, v. 27, n. 7, p.2053-2069, 2013.
- GLAUSER, Stephan; WICKENHÄUSER, Martin. Bubble Movement in Downward-Inclined Pipes. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 11, p.1012-1015, 2009.
- HIRT, C.w; NICHOLS, B.d. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal Of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p.201-225, 1981.
- LI, James; MCCORQUODALE, Alex. Modeling Mixed Flow in Storm Sewers. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 11, p.1170-1180, 1999.
- LI, James; MCCORQUODALE, Alex. Modeling the Transition from Gravity to Pressurized Flows in Sewers. **Urban Drainage Modeling**, p.134-145, 2001
- MENEZES FILHO, Frederico Carlos Martins de; COSTA, Alfredo Ribeiro da. Sistemática de Cálculo para o Dimensionamento de Galerias de Águas Pluviais: uma Abordagem Alternativa. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 4, n. 1, p.12-22, 2012.
- NOMERITAE, Nomeritae; BUI, Ha Hong; DALY, Edoardo. Modeling Transitions between Free Surface and Pressurized Flow with Smoothed Particle Hydrodynamics. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 5, p.04018012-1-04018012-11, 2018.
- SONG, Charles C. S.; CARDLE, James A.; LEUNG, Kim Sau. Transient Mixed-Flow Models for Storm Sewers. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 109, n. 11, p.1487-1504, 1983.
- VASCONCELOS, Jose G.; WRIGHT, Steven J.. Geysering Generated by Large Air Pockets Released through Water-Filled Ventilation Shafts. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 5, p.543-555, 2011.
- VASCONCELOS, Jose G.; WRIGHT, Steven J.. Investigation of rapid filling of poorly ventilated stormwater storage tunnels. **Journal Of Hydraulic Research**, v. 47, n. 5, p.547-558, 2009.
- VASCONCELOS, Jose; WRIGHT, Steven J.. Numerical Modeling of the Transition between Free Surface and Pressurized Flow in Storm Sewers. **Journal Of Water Management Modeling**, p.189-214, 2004.