

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE PERDA LOCALIZADA NA MODELAGEM DE UMA REDE DE DRENAGEM CONECTADA EM T

Rodrigo Girardon Della Pace¹; Leandro Conceição Pinto²; Rutineia Tassi²; Yamila Soledad Chicherit¹; Fabiana Campos Pimentel¹; Francisco Paim de Freitas Neto¹; Gustavo Schefelbanis Araujo¹; Gabriel Sulzbach Pereira¹; Eliane Fischborn¹

Abstract: T-junctions are common in urban drainage networks, and the accurate estimation of head losses associated with these connections contributes to the hydraulic performance of the system. This study evaluated the influence of the local head loss coefficient (K) in a 90-degree T-junction modeled in SWMM, comparing the results with experimental data obtained in a hydraulic bench setup. The system analyzed, based on Pinto *et al.* (2021), consisted of PVC and acrylic pipe segments connected in a T-shape, allowing water depth measurements at different points of the conduit. A total of 81 laboratory experiments were conducted, combining three flow rate ratios and nine slope configurations, with three repetitions each. In SWMM, 351 simulations were carried out using seven literature-based K values (K_{lit}) and six values calculated using Hager's energy-based equation (K_{calc}), applied to the upstream (K_U) and lateral (K_L) branches of the T-junction. The results indicated that K values significantly affect the accuracy of simulated hydraulic head, with higher errors associated with higher coefficients. In tests with different flow rate ratios (q), better results (closer to the observed data) were obtained with lower K values. However, the limitation of SWMM regarding the insertion of negative K values restricted part of the analysis. It is concluded that an appropriate definition of the K coefficient improves the representation of hydraulic behavior in T-junctions, and further studies considering different geometries and flow conditions are recommended.

Resumo: Junções em T são comuns em redes de drenagem urbana, e a estimativa adequada das perdas de carga associadas a essas conexões contribui para o desempenho hidráulico do sistema. Este estudo avaliou a influência do coeficiente de perda de carga localizada (K) em uma conexão T de 90 graus modelada no SWMM, comparando os resultados com dados experimentais obtidos em bancada hidráulica. O sistema analisado, baseado em Pinto *et al.* (2021), foi composto por trechos em PVC e tubos de acrílico conectados em T, permitindo medições da lâmina d'água em diferentes pontos do conduto. Foram realizados 81 ensaios experimentais em laboratório, combinando três razões de vazão e nove configurações de declividade, com três repetições cada. No SWMM, foram executadas 351 simulações, utilizando sete valores de K da literatura (K_{lit}) e seis valores calculados pela equação de Hager (K_{calc}), aplicados aos trechos montante (K_U) e lateral (K_L) da conexão em T. Os resultados indicaram que os valores de K influenciam significativamente as estimativas de carga hidráulica simulada, com maiores erros associados aos coeficientes mais elevados. Em ensaios com diferentes razões de vazão (q), observou-se que o ajuste K em valores menores resultou em melhores resultados (mais próximos com o observado), no entanto, a limitação do SWMM quanto à inserção de valores negativos de K restringiu parte da análise. Conclui-se que a definição apropriada do coeficiente K melhora a representação do comportamento hidráulico em junções T, sendo recomendada a realização de estudos adicionais que considerem diferentes geometrias e condições de escoamento.

Palavras-Chave – conexão em T; perda de carga localizada; modelagem hidráulica.

1) Programa de Pós-Graduação em engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Santa Maria: rodrigodelapace02@gmail.com; yamichicherit@hotmail.com; fabiana.pimentel@acad.ufsm.br; francisco.freitas@acad.ufsm.br; gustavo.esa@hotmail.com; gabrielpereirars@gmail.com; elianefischborn17@gmail.com.

2) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Santa Maria: leandro.pinto@ufsm.br; ruti@ufsm.br.

INTRODUÇÃO

As junções em forma de T são componentes comuns em muitos sistemas de condução de fluidos (Su *et al.*, 2023), como as redes de drenagem urbana e, prever com precisão as perdas de pressão que podem ocorrer em razão da existência dessas topologias complexas permite obter projetos adequados e uma operação eficiente do sistema (Abdulwahhab, 2013). Em uma conexão de 90 graus a geometria das bordas produz efeitos nas características do escoamento (Yin *et al.*, 2022), podendo impactar de forma significativa a estrutura e a intensidade do campo de velocidade, o que influencia na distribuição de pressão e nas perdas de carga (Costa *et al.*, 2006).

Dada a grande dificuldade de realizar análises experimentais em redes de drenagem pluvial, especialmente na etapa de projeto (Sañudo *et al.*, 2023), as simulações numéricas estão sendo cada vez mais utilizadas como uma ferramenta auxiliar para melhor compreensão dos fenômenos de escoamento complexo que ocorrem nesses sistemas (Luo *et al.*, 2022). O SWMM (*Storm Water Management Model*) tem sido amplamente utilizado no projeto e na gestão de sistemas de drenagem urbana, devido à sua capacidade de simular redes complexas e prever a resposta do sistema a diversos cenários de projeto e eventos de chuva (Niazi *et al.*, 2017), no entanto, os resultados das simulações são fortemente influenciados pela definição de parâmetros hidráulicos, condições iniciais e de contorno (Li *et al.*, 2020).

Nas simulações dinâmicas de sistemas com geometrias complexas, como a conexão em forma de T, por exemplo, o SWMM inclui componentes de perdas de energia representados por um coeficiente de resistência localizada (K), que é utilizado no cálculo da perda de carga (Rossman, 2017). Verifica-se que não há uma definição clara na literatura sobre valores adequados para a simulação do escoamento em regime permanente, sendo que diversos estudos indicaram valores ou propuseram metodologias de cálculo do parâmetro K, sem que haja um consenso nesse sentido (Abdulwahhab, 2013; Costa *et al.*, 2006).

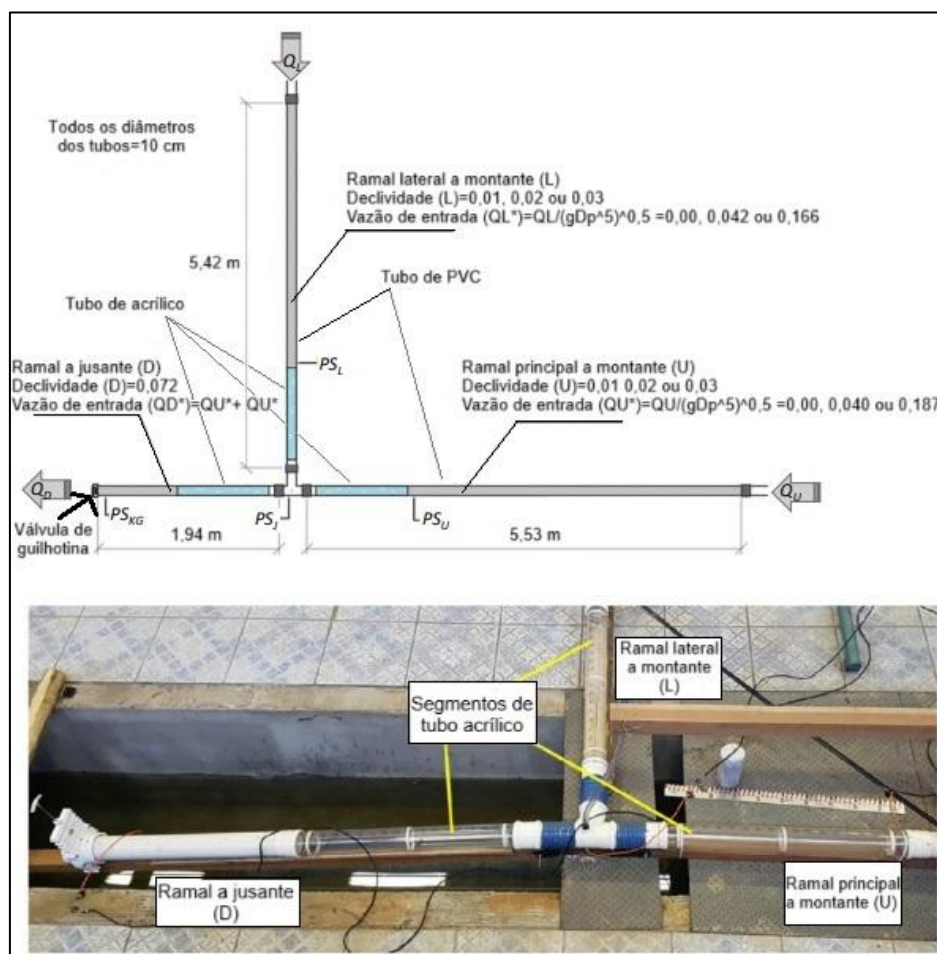
Neste estudo, características do escoamento de um sistema experimental avaliado em laboratório foram utilizadas para avaliar a influência da incerteza do valor do coeficiente de perda de carga localizada (K) em uma conexão T de 90 graus. A rede de drenagem experimental foi representada de forma fidedigna no SWMM, e os resultados da simulação foram comparados com os resultados obtidos em laboratório para a mesma rede. Durante as simulações, foram investigadas variações de K, com o objetivo de determinar os coeficientes que proporcionaram os melhores resultados de cargas hidráulicas simuladas, em comparação com o comportamento observado durante os ensaios laboratoriais no sistema experimental.

METODOLOGIA

O sistema experimental avaliado foi proposto por Pinto *et al.* (2021), e simula uma rede de drenagem em PVC composta por 3 trechos executados com tubulação de 10 cm de diâmetro conectados em forma de T (Figura 1). Os trechos foram designados como montante (U), localizado no alinhamento principal da instalação, lateral (L), na entrada perpendicular na conexão T, e jusante (D), logo após conexão em T. Nas proximidades da conexão em T, foram utilizados tubos de acrílico com o mesmo diâmetro e comprimento de 1 m, com o objetivo de permitir a medição e inspeção visual da lâmina d'água e da área da seção molhada.

Os ensaios experimentais em laboratório foram realizados considerando o escoamento em regime permanente, com declividades variando entre 1 e 3% (0,01 a 0,03 m/m) nos trechos montante principal (U) e lateral (L), enquanto o trecho jusante (D) foi mantido com declividade fixa de 7,2% (0,072 m/m) com o objetivo de evitar efeitos de remanso. As vazões (Q) nos trechos montante (QU) e lateral (QL) foram variáveis (nula ou 0,37 L/s), e todas as combinações foram ensaiadas três vezes, para fins de consistência das informações.

Figura 1 - Representação do experimento avaliado (Pinto *et al.*, 2021)



Durante cada rodada experimental, eram quantificadas as lâminas d'água nos trechos das tubulações em acrílico. Estes resultados experimentais de lâmina d'água foram então utilizados como referência, para avaliar o grau de adesão da resposta obtida durante a simulação com o SWMM, à medida em que eram avaliados diferentes valores de K empregados. Foram identificados, durante o processo, o conjunto de valores do parâmetro K que representou de maneira mais precisa as cargas hidráulicas nos diferentes trechos do sistema próximos à conexão. Utilizou-se o percentual de erro (Erro %) entre a lâmina d'água simulada e a observada como indicador nos processos de análise, conforme Equação 1:

$$Erro \% = \left(\frac{h_{sim} - h_{obs}}{h_{obs}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo: h_{sim} a lâmina d'água obtida no SWMM e h_{obs} a lâmina d'água medida experimentalmente.

O sistema representado no SWMM é fidedigno ao ensaio experimental, sendo utilizado o coeficiente de rugosidade de Manning (n) para o material PVC igual a 0,009 em todos os trechos (UNI-BELL PVC PIPE ASSOCIATION, 2001). Durante as simulações, o coeficiente K foi variado manualmente nos três trechos conectados ao T (montante, lateral e jusante). O range de variação para os valores de K seguiu recomendações da literatura (K_{lit}), além de valores determinados (K_{calc}) conforme a equação proposta por Hager (1999). Os valores de K_{lit} podem variar de -2 a 3 (Abdulwahhab, 2013; Luaibi, Abdulwahid, 2022), dependendo da geometria, das vazões e das declividades da conexão na rede de drenagem. Não é possível utilizar valores negativos para o K como entrada no SWMM, devido a uma restrição do modelo. Assim, tomando como referência as informações bibliográficas (Abdulwahhab, 2013; Luaibi, Abdulwahid, 2022), foram utilizados nas simulações valores de K_{lit} entre 0 (inicial) e 3 (final), com incrementos (ΔK) iguais a 0,5, desde o valor inicial até o final, totalizando sete valores distintos: 0,0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0.

Complementarmente, foram determinados valores de K_{calc} , utilizando o procedimento recomendado por Hager (1999), que emprega a equação de energia (Equação 2) para cada trecho a montante de uma conexão, a fim de considerar a perda de energia em sistemas de drenagem.

$$\frac{p_i}{\gamma} + z_i + \frac{V_i^2}{2g} = \frac{p_o}{\gamma} + z_o + \frac{V_o^2}{2g} + K \frac{|V_o|V_o}{2g} \quad (2)$$

Sendo: p_i a carga de pressão, z_i a elevação do fundo da tubulação (altura invertida), V a velocidade, g a aceleração da gravidade, γ o peso específico e K a constante de perda de carga localizada.

O valor de K_{calc} é determinado separadamente para os segmentos de montante (U) e lateral (L) à conexão em T, utilizando as Equações 3 e 4, propostas por Hager (1999):

$$K_U = (\mu^{-1} - 1)^2 - 1 + 3q - 2q^2 \quad (3)$$

$$K_L = (\mu^{-1} - 1)^2 + q - 2q^2 \quad (4)$$

Sendo: q a razão entre a vazão a montante (Q_U) e a vazão a jusante (Q_D), e μ é determinado pela Equação 5:

$$\mu^{-1} = \left(1 + \left[(1 - q)(2 - q) \left(1 - \frac{2}{3} \cos \alpha - \frac{1}{3} \cos^2 \alpha \right) + \frac{1}{9} \cos^2 \alpha \right]^{1/2} \right) \left(1 + \frac{1}{3} \cos \alpha \right)^{-1} \quad (5)$$

Sendo: α o ângulo entre os trechos lateral e principal na conexão em T.

A partir desta abordagem, resultaram os valores de K_{calc} apresentados na Tabela 1, calculados separadamente para os trechos montante (K_U) e lateral (K_L), com base na razão de vazão (q) e no ângulo da conexão.

Tabela 1 - Valores de K determinados a partir da proposta de Hager (1999)

q	K_U	K_L
0,0	3,12	3,12
0,5	1,73	0,74
1,0	0,12	-1,88

Foram considerados seis valores distintos de K_{calc} correspondentes às combinações de K_U e K_L para três razões de vazão analisadas: $q=0,0$, $0,5$ e $1,0$. Em cada simulação, os valores de K_U e K_L correspondentes à razão de vazão do ensaio foram aplicados aos trechos montante e lateral, respectivamente. O valor negativo obtido na equação $(-1,88)$ foi inserido no modelo SWMM utilizando seu respectivo valor absoluto, devido à limitação do *software* quanto à valores negativos.

No total foram realizados 81 ensaios experimentais em laboratório, correspondentes a 27 combinações únicas de declividade e vazão para três razões de vazão, com três repetições cada. Com base nessas configurações, foram executadas 351 simulações no SWMM, aplicando sete valores de K da literatura (K_{lit}) e seis valores calculados pela equação de Hager (K_{calc}).

RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os parâmetros físicos adotados em cada ensaio e simulação no SWMM, detalhando as declividades e vazões nos trechos montante (U) e lateral (L), bem como a razão de vazão q aplicada.

Tabela 2 - Parâmetros adotados nos ensaios e simulações no SWMM

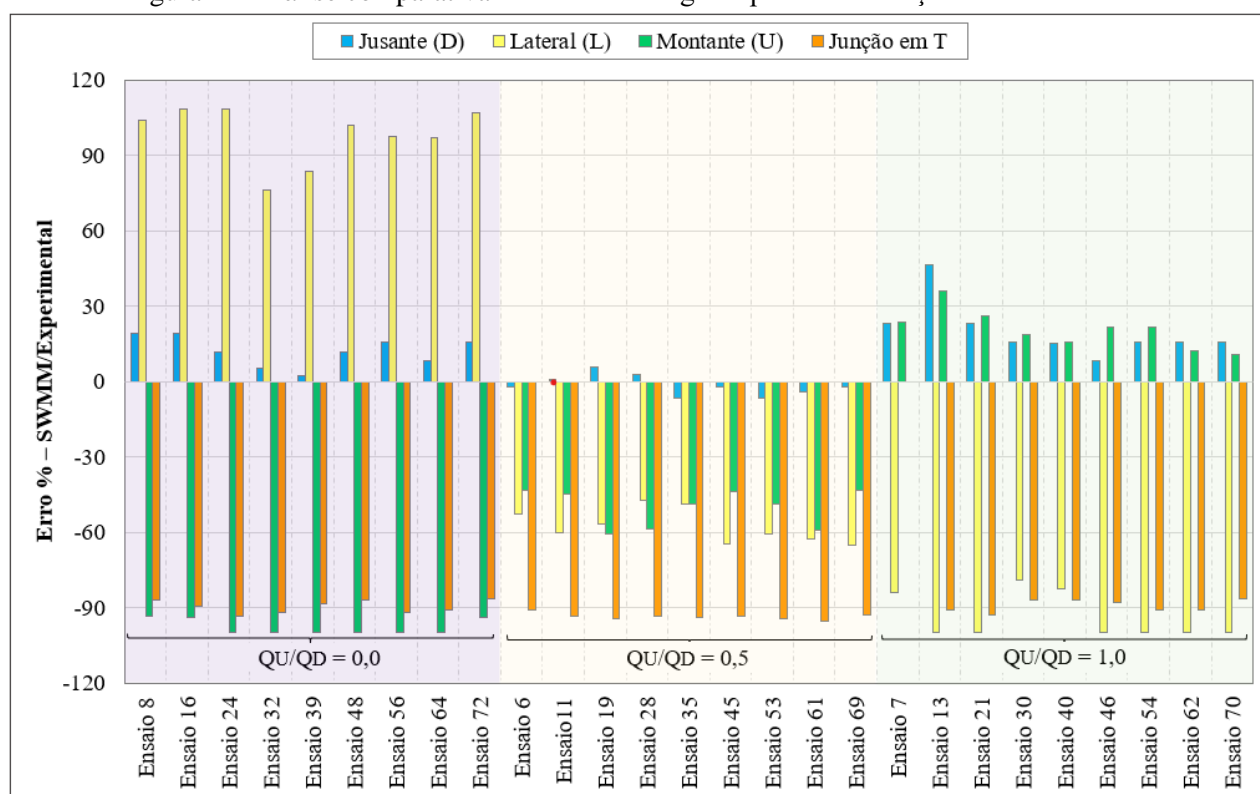
q	Ensaio	Declividade (%) principal a montante (U)	Declividade (%) lateral a montante (L)	Vazão (L/s) principal a montante (U)	Vazão (L/s) lateral a montante (L)
0	8	1	1	0	0,37
	16	1	3	0	0,37
	24	3	3	0	0,37
	32	3	1	0	0,37
	39	2	1	0	0,37
	48	2	2	0	0,37
	56	2	3	0	0,37
	64	3	2	0	0,37
	72	1	2	0	0,37
0,5	6	1	1	0,37	0,37
	11	1	3	0,37	0,37
	19	3	3	0,37	0,37
	28	3	1	0,37	0,37
	35	2	1	0,37	0,37
	45	2	2	0,37	0,37
	53	2	3	0,37	0,37
	61	3	2	0,37	0,37
	69	1	2	0,37	0,37
1	7	1	1	0,37	0,00
	13	1	3	0,37	0,00
	21	3	3	0,37	0,00
	30	3	1	0,37	0,00
	40	2	1	0,37	0,00
	46	2	2	0,37	0,00
	54	2	3	0,37	0,00
	62	3	2	0,37	0,00
	70	1	2	0,37	0,00

Para $q=0$, toda a vazão (0,37 L/s) entra pelo trecho lateral. Para $q=0,5$, a vazão é igualmente dividida entre os dois trechos (0,37 L/s em U e 0,37 L/s em L). Para $q=1$, toda a vazão entra pelo trecho principal. Além disso, cada ensaio apresenta diferentes combinações de declividade nos trechos montante, influenciando o comportamento hidráulico da conexão.

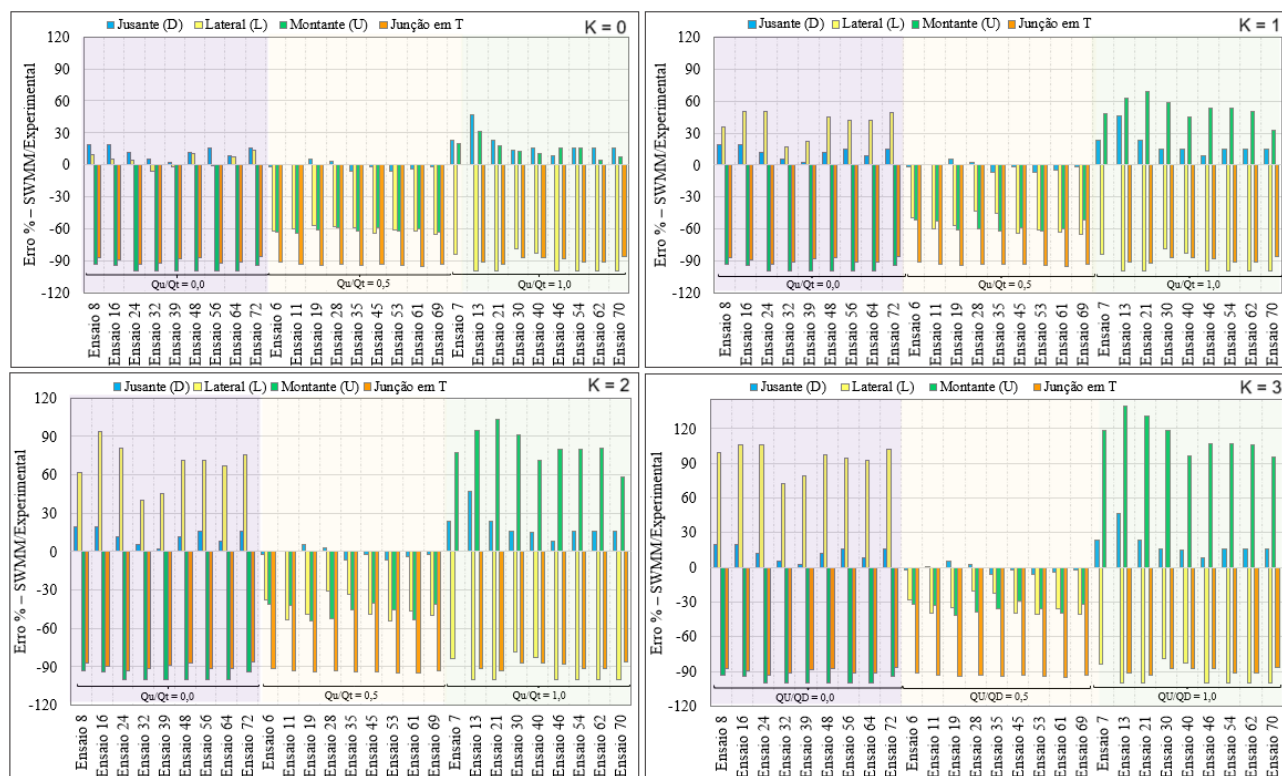
A Figura 2 apresenta os erros percentuais (Erro %) entre as lâminas d'água observadas e simuladas no SWMM. A Figura 2a mostra os resultados com os coeficientes calculados (K_{calc}), aplicados conforme a razão de vazão (q) em cada ensaio, com valores de K_U e K_L determinados pela metodologia de Hager (1999).

A Figura 2b apresenta os erros obtidos com os coeficientes da literatura (K_{lit}) para os valores 0, 1, 2 e 3. O valor $K_{lit}=3$ foi incluído por apresentar os maiores desvios em relação aos dados observados e comportamento semelhante ao de K_{calc} . Por limitação de espaço, apenas quatro valores representativos de K_{lit} foram incluídos na Figura 2b.

Figura 2 - Análise comparativa das lâminas d'água a partir da variação do coeficiente K



a) Resultados obtidos com os coeficientes calculados (K_{calc}), conforme a metodologia proposta por Hager (1999).



b) Resultados obtidos com os coeficientes da literatura (K_{lit}), para os valores 0, 1, 2 e 3, conforme sugerido por Abdulwahhab (2013) e Luaibi e Abdulwahid (2022).

Os erros percentuais (Erro %) entre as lâminas simuladas e observadas experimentalmente para os coeficientes K calculados (K_{calc}) indicam semelhança de resultados, com relação ao $K_{lit}=3$. Além disso, em todas as análises, as vazões nos diferentes trechos influenciam os resultados das simulações do sistema. Observa-se na Figura 2b que, para os ensaios com razão de vazões $q=0$ (fluxo apenas no trecho lateral), os erros percentuais nos trechos U e T foram elevados (próximos de -90%), porém apresentaram pouca variação entre os diferentes valores de K testados, indicando baixa sensibilidade do modelo ao ajuste de K.

No entanto, observa-se uma diminuição no Erro % entre as lâminas d'água observadas e simuladas para o trecho lateral à medida que os valores de K se aproximam de zero, com uma diferença média, para todos os ensaios, de aproximadamente 90% entre o maior e o menor valor de K ajustado ($K=3$ e $K=0$, respectivamente).

Diferentemente do observado para $q=0$, nos ensaios com razão $q=1$ (fluxo apenas no segmento principal), o trecho U apresenta uma redução nos erros percentuais à medida que o valor de K diminui. A diferença média foi aproximadamente 98% entre o maior e o menor valor de K ajustado para os diferentes ensaios. Para a razão $q=0,5$, em que a vazão no trecho a jusante é o dobro da vazão proveniente do trecho a montante, observa-se que nenhum trecho apresentou grandes variações no erro, embora tenham sido registrados altos erros percentuais nos dois trechos a montante, especialmente na conexão T.

Destaca-se que não foi possível avaliar valores negativos para o coeficiente K, visto que a versão atual do SWMM apresenta restrições nesse sentido. Portanto, com base nas análises realizadas,

estima-se que seria possível obter melhores resultados com tais valores, sendo viável determinar coeficientes K que se ajustem adequadamente aos dados observados.

A inversão entre valores positivos e negativos de K está possivelmente relacionada à variação no padrão de escoamento interno da conexão em T . Para $q=0$, o fluxo entra pela lateral, causando fortes separações e recirculações que amplificam as perdas de energia. Já para $q=1$, o escoamento é direcionado ao longo do ramo principal, com possibilidade de recuperação de energia cinética e trabalho difusivo favorecendo inversão do sinal de K .

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram uma grande variação nos valores de carga hidráulica calculados em relação aos observados, com altos percentuais de erro para os diferentes valores do coeficiente K analisados. Embora os resultados sugiram que valores menores de K produziram melhores estimativas para as diferentes configurações experimentais analisadas, não foi encontrada uma relação satisfatória entre os níveis de água simulados e os medidos.

Nesse sentido, o estudo destaca a importância de se ter cautela na escolha de valores fixos para o coeficiente K durante o processo de modelagem, além de ressaltar a necessidade da realização de estudos experimentais mais aprofundados que considerem diversas condições de escoamento para uma definição mais precisa desse parâmetro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) através do Centro de Tecnologia, juntamente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, além do esforço de todos e apoio dos membros do grupo de pesquisa em Modelagem HidroAmbiental e Ecotecnologias.

REFERÊNCIAS

- ABDULWAHHAB, M. (2013). “*Numerical prediction of pressure loss of fluid in a T-junction*”. International Journal of Energy and Environment, 4(2), pp. 253–264.
- Costa, N. P.; Maia, R.; Proença, M. F.; Pinho, F. T. (2006). “*Edge effects on the flow characteristics in a 90 deg tee junction*”. Journal of Fluids Engineering, 128(6), pp. 1204–1217.
- HAGER, W. H. (1999). *Wastewater Hydraulics – Theory and Practice*. 2th ed. Springer, New York-NY.
- Li, Q.; Liang, Q.; Xia, X. (2020). “*A novel 1D-2D coupled model for hydrodynamic simulation of flows in drainage networks*”. Advances in Water Resources, 137, pp. 103519.
- LUAIBI, M.; ABDULWAHID, M. (2022). “*Numerical analysis by computational fluid dynamic simulation of fluid flow in a T-junction*” in Proceedings of the EAI II International Multi-Disciplinary Conference Theme: Integrated Sciences and Technologies, Sakarya, Set. 2022.

LUO, P.; LUO, M.; LI, F.; QI, X.; HUO, A.; WANG, Z.; HE, B.; TAKARA, K.; NOVER, D.; WANG, Y. (2022). *Urban flood numerical simulation: Research, methods and future prospects*. Journal of Hydrology, 156, 105478.

NIAZI, M.; NIETCH, C.; JACKSON, N.; BENNETT, B.; MAGHREBI, M.; TRYBY, M.; MASSOUDIEH, A. (2017). *Storm Water Management Model (SWMM): Performance Review and Gap Analysis*. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 3(2).

Pinto, L. C.; Tassi, R.; Vasconcelos, J. G.; Allasia, D. G.; Bocchi, J. P. P.; Minetto, B.; Pachaly, R. L. (2021). “Laboratory-scale investigation of the pressurization of T-junctions in hydraulic systems”. Water, 13(2970), pp. 1–16.

ROSSMAN, L. A. (2017). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

SAÑUDO, E.; CEA, L.; PUERTAS, J.; NAVES, J.; ANTA, J. (2024). *Large-scale physical facility and experimental dataset for the validation of urban drainage models*. Hydrological Processes, 38, 15068.

SU, B.; HUANG, K.; LIN, M.; WANG, Q. (2023). *Experimental investigation on the flow patterns in a T-junction under steady and rolling motion conditions using PLIF*. Chemical Engineering Journal, 465, 142772.

UNI-BELL PVC PIPE ASSOCIATION. (2001). *Handbook of PVC Pipe Design and Construction*. 4th ed., Dallas-TX.

YIN, Y.; LI, A.; WU, D.; WEN, X.; LI, J.; GUO, J.; MA, Y. (2024). *Comparison and analysis of energy loss and flow characteristics of T-junctions via secondary flow and entropy production*. Building and Environment, 225, 109635.