



ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DE FUGAS DE ÁGUA NOS REGIMES TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

Marta Cabral^{1,*}, Rafael Benatti^{1,2}, João Paulo Ferreira³, Dídia Covas¹

¹CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal.

^{1,2}Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, CEP 13566-590 São Carlos, SP, Brasil.

³Departamento de Gestão da Água, Faculdade de Engenharia Civil e Geociências, Universidade Técnica de Delft, Delft, Países Baixos.

*marta.f.cabral@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Esta comunicação tem como objetivo analisar o efeito de fugas de água nos regimes transitórios hidráulicos em sistemas pressurizados. São realizados ensaios experimentais numa instalação localizada no Laboratório de Hidráulica e Ambiente do Instituto Superior Técnico (Portugal) para diferentes valores de caudal inicial em regime permanente e dimensões de fuga. A presença da fuga provoca uma queda de pressão e contribui para o aumento do amortecimento e da dispersão da onda de pressão. O caudal inicial também influencia significativamente a amplitude das flutuações de pressão, o amortecimento e a dispersão da onda de pressão. A caracterização das ondas de pressão na presença de fugas de água é particularmente útil para a sua deteção, localização e quantificação em sistemas de abastecimento de água. Pretende-se, no futuro, estudar o efeito da localização da fuga nos transitórios hidráulico, simular numericamente estes fenómenos e implementar e comparar diferentes métodos de deteção de fugas.

Palavras-Chave

Transitórios hidráulicos, sistemas pressurizados, fugas de água

1. INTRODUÇÃO

As perdas de água nos sistemas de abastecimento de água têm vindo a tornar-se cada vez mais uma preocupação para as entidades gestoras de água e decisores políticos, representando perdas de água tratada e de energia. Em Portugal, as perdas reais de água representam um valor $5.8 \text{ m}^3/(\text{km}.\text{dia})$, incluindo fugas de água e ruturas [1]. As fugas de água são normalmente muito difíceis de localizar e quantificar, porque representam volumes de água muito pequenos causados pela falta de estanqueidade nos acessórios de rede e válvulas ou até de pequenas roturas em condutas. Contrariamente, ruturas resultam de problemas

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

estruturais da rede ou de alterações repentinas no modo de operação sendo, normalmente, detetadas e reparadas de forma imediata.

As fugas de água podem ser causadas por diferentes fatores nomeadamente variações de pressão, idade das infraestruturas, inadequado dimensionamento e construção do sistema e características do solo [2]. Foram desenvolvidos vários métodos para a deteção e localização de fugas de água, podendo dividir-se em métodos de observação diretos [3], métodos de inferência [4; 5] e métodos inversos [6; 7].

Nas últimas décadas, diferentes métodos baseados em regimes transitórios têm sido desenvolvidos e aplicados, representando uma ferramenta importante para a deteção, localização e quantificação de fugas de água em sistemas pressurizados. Estes métodos permitem o reconhecimento das características das condutas através da análise das ondas de pressão que se propagam ao longo do sistema durante um regime transitório.

Esta comunicação tem como objetivo analisar e discutir o efeito de fugas de água nos regimes transitórios hidráulicos em sistemas pressurizados. Para tal, é realizado um conjunto alargado de ensaios experimentais para diferentes valores de caudal inicial em regime permanente e para diferentes dimensões de fuga. Pretende-se estudar o efeito do caudal de fuga de água nas características da onda de pressão, nomeadamente na queda de pressão inicial que ocorre na primeira sobrepressão, nas variações de pressões máximas e mínimas e no amortecimento e dispersão da onda.

2. METODOLOGIA

2.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

A instalação experimental localizada no Laboratório de Hidráulica e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, do Instituto Superior Técnico foi construída especificamente para o estudo dos regimes transitórios hidráulicos em sistemas pressurizados de água. Esta instalação é constituída por uma conduta de cobre disposta de forma helicoidal com um comprimento de aproximadamente 100 m, 20 mm de diâmetro interno e 1 mm de espessura (Figura 1).



Figura 1. Instalação experimental

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Na extremidade a montante da instalação, a água é armazenada num reservatório com capacidade de 125 L e elevada através de uma bomba centrífuga com caudal nominal de $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ e altura de elevação nominal de 43 m para um reservatório hidropneumático de 60 L (Figura 2). O reservatório hidropneumático permite estabilizar a pressão proveniente da bomba e proteger o sistema contra os transitórios hidráulicos.

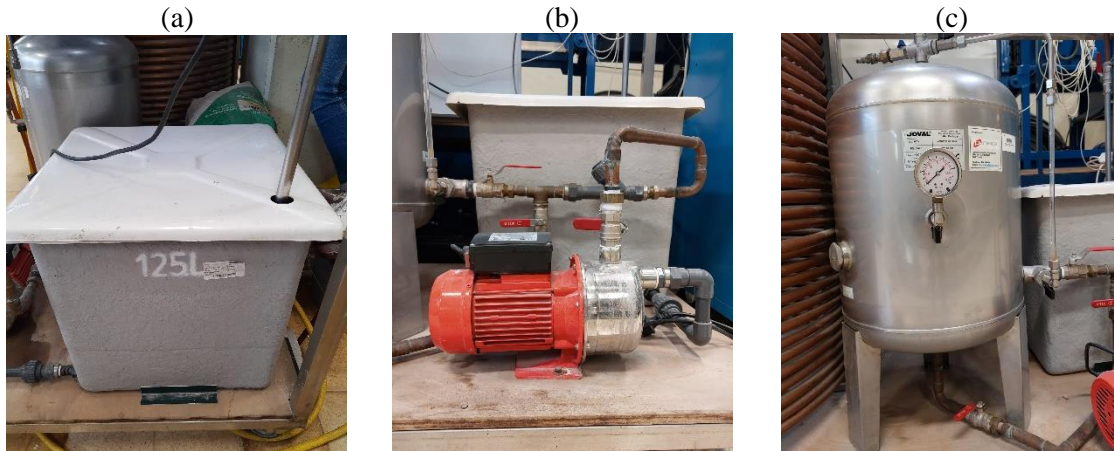


Figura 2. Componentes da extremidade de montante do sistema: (a) reservatório; (b) bomba centrífuga; e (c) reservatório hidropneumático

Na extremidade a jusante do sistema está instalada uma ventosa para a libertação de ar no interior do sistema, uma válvula esférica com atuador pneumático de acionamento elétrico para gerar o transitório hidráulico através do fecho rápido da mesma e uma válvula manual esférica para controlar o caudal inicial em regime permanente (

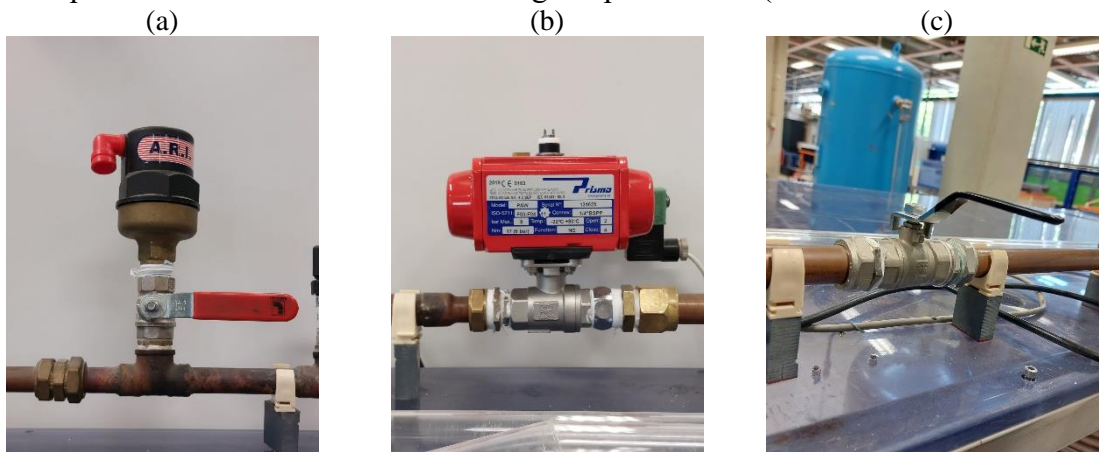


Figura 3). A válvula com atuador pneumático tem um fechamento efetivo de 0.0021 s, garantindo que a manobra efetuada é considerada rápida [8].

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

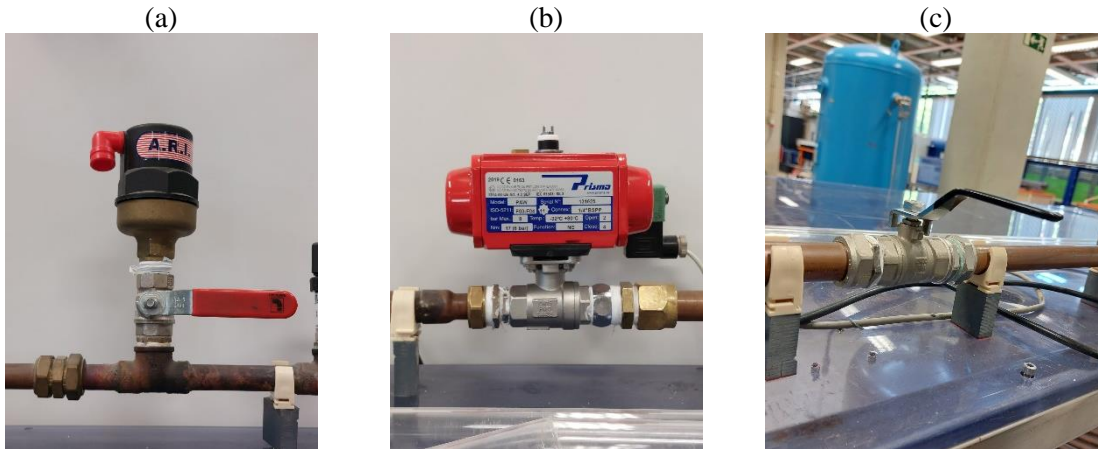


Figura 3. Componentes da extremidade de jusante do sistema: (a) ventosa; (b) válvula esférica com atuador pneumático; e (c) válvula esférica manual

O sistema de aquisição dados é composto por um computador, um osciloscópio (PicoScope™: Pico Technology, St Neots, UK), três transdutores de pressão 0-25 bar e um caudalímetro eletromagnético DN10 (

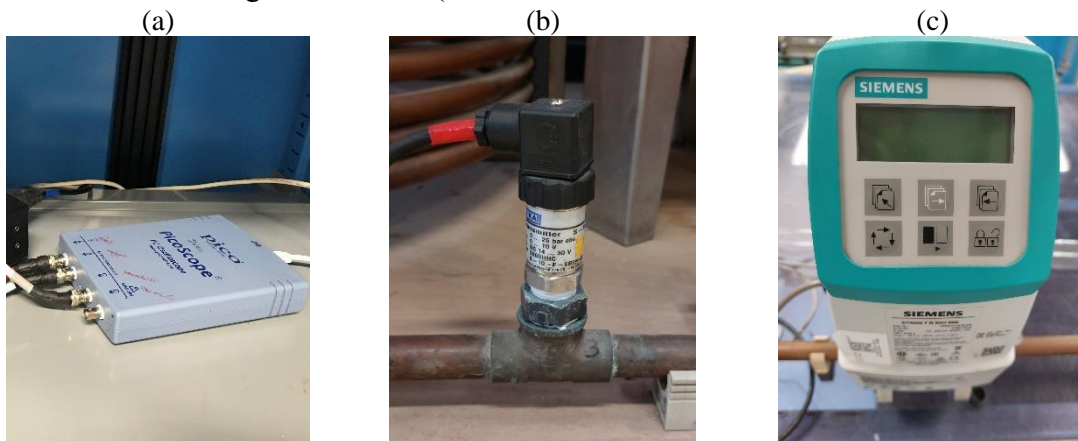


Figura 4). Os transdutores de pressão estão dispostos ao longo da conduta: o transdutor T1 está localizado a montante da conduta ($x \approx 0$ m), o transdutor T2 está instalado na secção intermédia ($x \approx 50$ m) e o transdutor T3 está localizado imediatamente a montante da válvula esférica com atuador pneumático ($x \approx 100$ m).

SMART WATER:

Transição hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

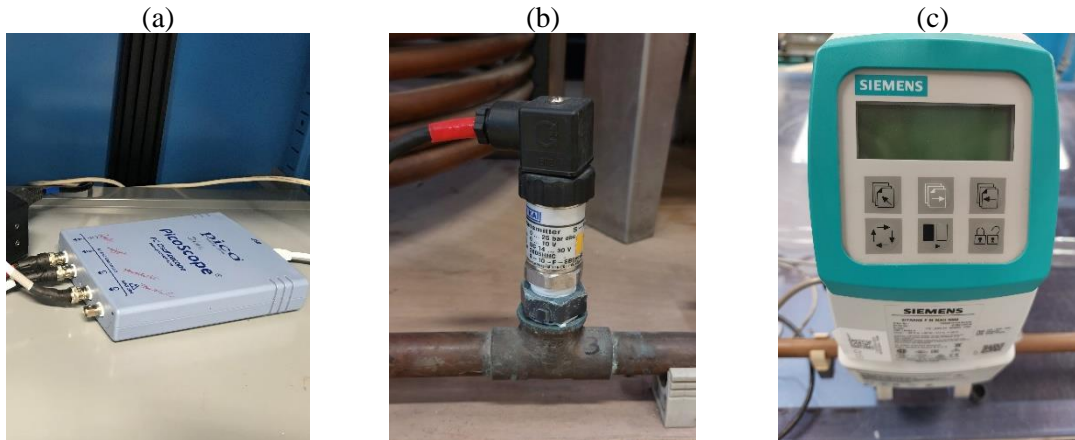


Figura 4. Componentes do sistema de aquisição de dados: (a) osciloscópio (b) transdutores de pressão; e (c) caudalímetro eletromagnético

2.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Pretende-se ensaiar uma fuga de água descrita como orifício único, i.e., uma fuga localizada num nó específico do sistema cujo caudal é função da pressão. A fuga é simulada através de uma válvula esférica manual com um orifício na extremidade localizada entre o transdutor T1 e o transdutor T2. Efetuou-se um conjunto de ensaios experimentais para cinco caudais iniciais, variáveis entre 50 e 370 L/h (Quadro 1). A celeridade das ondas de pressão é calculada com base nas medições experimentais através de três métodos diferentes (i.e., o período da onda, a distância entre os dois transdutores e a formulação de Joukowsky), tendo-se obtido valores variáveis entre 1063.93 e 1362.25 m/s, próximos do valor de celeridade obtido pela formulação teórica (1251.00 m/s).

Quadro 1. Ensaios experimentais: caudal inicial, velocidade média, número de Reynolds

Caudal inicial, Q_0 (L/h)	Caudal inicial, Q_0 (m ³ /s)	Velocidade média inicial, U_0 (m/s)	Número de Reynolds inicial, Re_0 (-)	Regime de escoamento
50	1.4E-05	0.04	884	Laminar
130	3.6E-05	0.11	2299	Transição
210	5.8E-05	0.19	3714	Transição
290	8.1E-05	0.26	5128	Turbulento
370	1.0E-04	0.33	6543	Turbulento

São ensaiados os diâmetros do orifício de 1, 2 e 3 mm para simular diferentes dimensões de fuga. Cada ensaio é repetido cinco vezes de forma a garantir a replicabilidade e consistência dos valores medidos. No Quadro 2 apresentam-se as características das fugas de água ensaiadas.

Quadro 2. Ensaios experimentais: características das fugas ensaiadas

Diâmetro do orifício, D_F (mm)	Área do orifício, A_F (m ²)	Caudal da fuga, Q_F (l/s)	Velocidade média inicial, U_F (m/s)	D_F/D (%)
----------------------------------	---	-----------------------------	---------------------------------------	-------------

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

1	7.85E-07	0.015	29.38	5
2	3.14E-06	0.062	29.38	10
3	7.07E-06	0.139	29.38	15

3. RESULTADOS

3.1 EFEITO DO CAUDAL

O transitório hidráulico é causado pelo fecho rápido (quase instantâneo) da válvula com atuador pneumático que provoca uma onda de pressão que se propaga na conduta. Esta onda corresponde a uma variação temporal da cota piezométrica medida no transdutor localizado imediatamente a montante da válvula com atuador pneumático. As seguintes características podem ser identificadas e analisadas: amplitude das flutuações de pressão, amortecimento ou dissipação da pressão e dispersão da onda. A amplitude refere-se à máxima variação de pressão observada, o amortecimento ou dissipação de pressão corresponde à atenuação da amplitude das flutuações de pressão e a dispersão da onda é o atraso de tempo ou a mudança de fase da onda de pressão.

O efeito do caudal inicial nos regimes transitórios hidráulicos é, inicialmente, apresentado para a situação sem fuga de água considerando uma variação de caudal entre 50 e 370 L/h conforme ilustrado na Figura 5. As pequenas variações de pressão observadas na primeira sobrepressão são causadas pela forma helicoidal da conduta e pelas vibrações na instalação experimental, uma vez que as condições de suporte afetam consideravelmente o sinal de pressão [9]. Tal como esperado, o aumento do caudal inicial provoca maiores variações de pressão e maior amortecimento e dispersão da onda. Não se verifica nenhuma queda de pressão inicial no primeiro período da onda, uma vez que estes ensaios são realizados para a situação sem fuga de água.

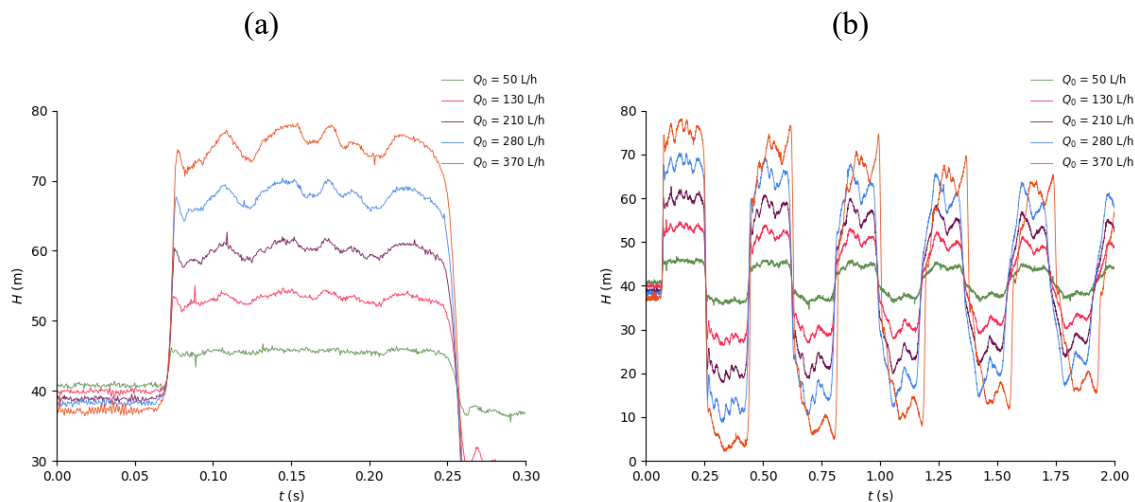


Figura 5. Análise do efeito do caudal sem fuga: (a) 0.7 s (detalhe); e (b) 2s

Na Figura 6 apresenta-se a variação temporal da cota piezométrica para analisar a influência do caudal inicial para a mesma dimensão de fuga (2 mm de diâmetro). A presença da fuga provoca uma queda de pressão na primeira sobrepressão dependente do caudal inicial. Esta

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

também é influenciada pela dissipação de energia em regime não permanente por atrito dependendo do regime de escoamento inicial. Adicionalmente, o amortecimento e a dispersão da onda de pressão também aumentam com o caudal inicial, visto que quanto maior o valor de caudal maiores as perdas por atrito.

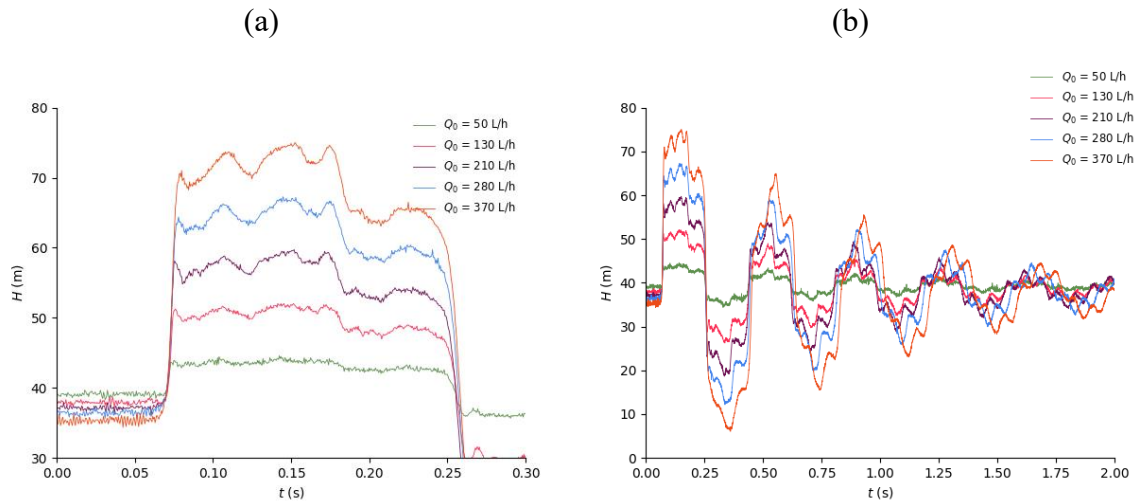


Figura 6. Análise do efeito do caudal com fuga ($D_L = 2\text{mm}$): (a) 0.7 s (detalhe); e (b) 2 s

3.2 EFEITO DA DIMENSÃO DA FUGA

Na Figura 7 apresentam-se as ondas de pressão para diferentes tempos de observação do transitório hidráulico, considerando uma variação da dimensão da fuga e um valor de caudal inicial constante ($Q_0 = 210 \text{ L/h}$). Os resultados são apresentados considerando valores de cotas piezométricas adimensionais, obtidas através da seguinte equação: $(H - H_0)/\Delta H_J$ em que H corresponde à cota piezométrica numa dada secção da conduta (m), H_0 é o valor inicial da cota piezométrica nessa mesma secção (m) e ΔH_J é a sobrepressão teórica de Joukowsky (m) dada por $\Delta H_J = aQ_0/(gS)$, em que a é a celeridades das ondas de elásticas (m/s), Q_0 é o caudal inicial (m^3/s), g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e S a área da secção da conduta (m^2).

A queda de pressão inicial na primeira onda aumenta com a dimensão da fuga e com o caudal inicial e decorre da saída de caudal pelo aumento de pressão. Adicionalmente, a onda de pressão é sujeita a uma atenuação da amplitude de pressão que aumenta com a dimensão da fuga (i.e., maior amortecimento ou dissipação da onda de pressão). Não se observa uma dispersão da onda de pressão (i.e., o atraso da onda de pressão) em resultado da presença da fuga de água.

SMART WATER:

Transição hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

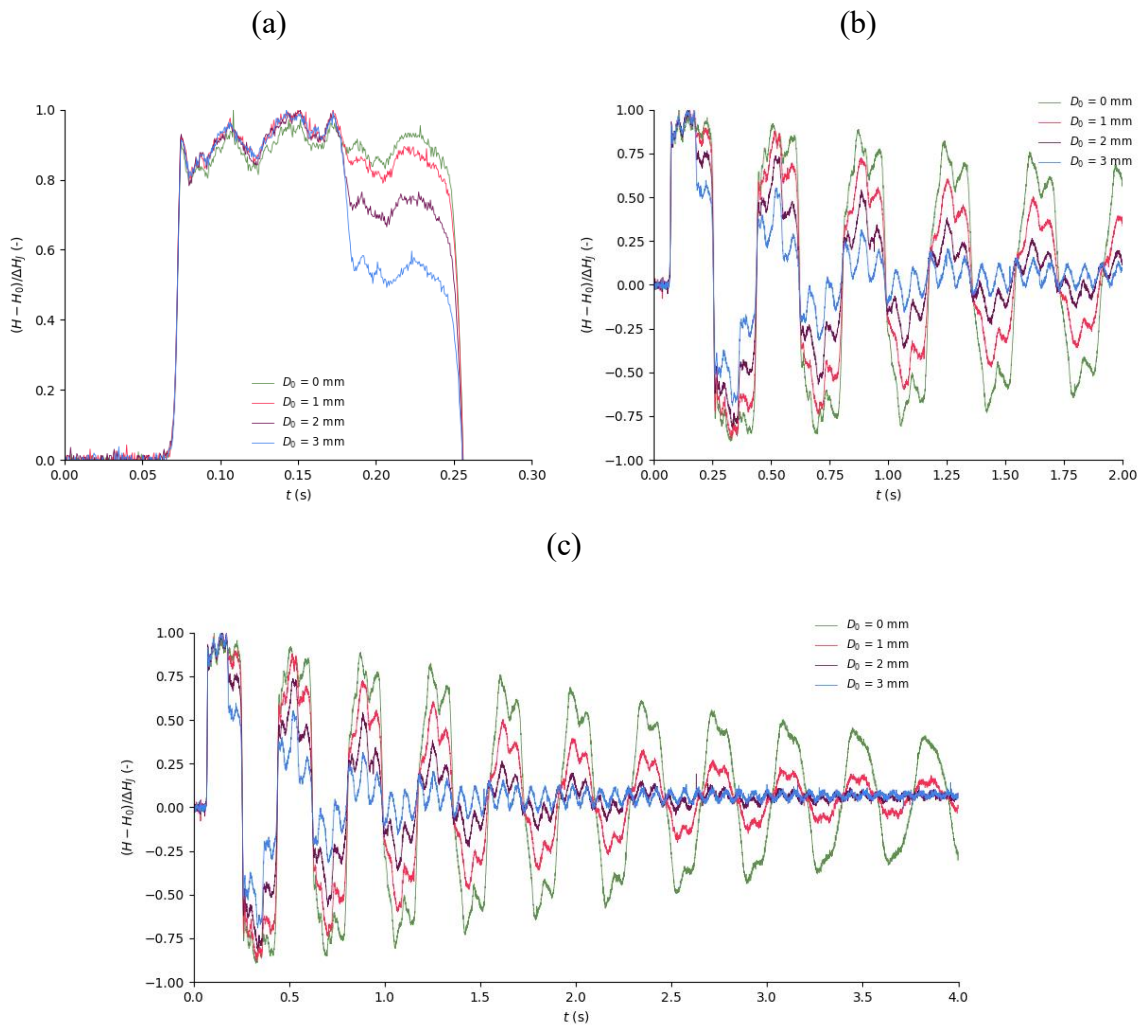


Figura 7. Análise do efeito da dimensão da fuga para um $Q_0 = 210$ L/h: (a) 0.7 s (detalhe); (b) 2 s; e (c) 4 s

4. CONCLUSÕES

A caracterização das ondas de pressão na presença de fugas de água é particularmente relevante para a sua deteção, localização e quantificação em sistemas de abastecimento de água. Neste sentido, esta comunicação teve como objetivo analisar e discutir o efeito de fugas de água nos regimes transitórios hidráulicos em sistemas pressurizados.

Diversos ensaios experimentais foram realizados considerando diferentes valores de caudal inicial em regime permanente e dimensões de fuga. O caudal inicial e a dimensão da fuga são parâmetros que influenciam significativamente diferentes características das ondas de pressão, em especial a amplitude das flutuações de pressão, o amortecimento ou dissipação de pressão e a dispersão da onda.

Pretende-se desenvolver como trabalhos futuros a análise experimental do efeito da localização da fuga nos regimes transitórios hidráulicos, a simulação numérica destes fenómenos e a implementação e comparação de diferentes métodos de deteção de fugas.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento UIDB/04625/2020 ao CERIS (Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability).

REFERÊNCIAS

- [1] Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) (2023). Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (RASARP), Volume 1 – Caracterização do setor de águas e resíduos. ISBN: 978-989-8360-43-4.
- [2] Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1): 25-45, DOI: 10.1080/15730621003610878.
- [3] Hunaidi, O., Chu, W., Wang, A., Guan, W. (2000). Detecting leaks in plastic pipes. *Journal American Water Works Association*, 92(2): 82–94.
- [4] Wang, X.-J., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Liggett, J.A., Vitkovský, J.P. (2002). Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7): 697–711.
- [5] Ferrante, M., Brunone, B., Meniconi, S., Almadori, C. (2005). Wavelet analysis of numerical pressure signals for leak monitoring. In: *Proceedings of CCWI2005, Water Management for the 21st Century*. Exeter, UK.
- [6] Vitkovský, J.P., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Wang, X.J. (2001). An experimental verification of the inverse transient technique. In: *Conference on Civil Engineering Hydraulics*. Hobart, Australia Institution of Engineers.
- [7] Covas, D., Ramos, H. (2010). Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(2): 248–257.
- [8] Ferreira, J., Martins, N., Covas, D. (2018). Ball Valve Behavior under Steady and Unsteady Conditions. *Journal of Hydraulic Engineering* 144(4): 04018005.
- [9] Ferràs, D., Manso, P. A., Schleiss, A. J., Covas, D. I. C. (2016). Experimental distinction of damping mechanisms during hydraulic transients in pipe flow. *Journal of Fluids and Structures* 66: 424-446.