

Um método expedito para avaliar o cumprimento de critérios de segurança de pessoas em ruas inundadas

Luís Mesquita David^{a, *}, Rita Fernandes de Carvalho^b

^aLNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

^bMARE, Department of Civil Engineering, University of Coimbra, 3030-788 Coimbra, Portugal

RESUMO

O produto da profundidade e da velocidade da inundação (hV) é o critério mais utilizado para definir os limiares da estabilidade e segurança de pessoas e viaturas face à ação dos caudais de inundação. Na maioria dos casos, os critérios de segurança têm limitado hV a valores entre 0,4 e 0,5 m²/s, embora estudos recentes proponham uma redução que vai até 0,22 m²/s em áreas urbanas. Neste artigo apresenta-se um método expedito que permite aferir o cumprimento de limites pré-estabelecidos do produto hV a partir unicamente dos caudais de inundação em arruamentos, isto é, sem se conhecer diretamente h e V , e de características facilmente quantificáveis do arruamento. Os caudais de inundação podem ser estimados através de modelos simplificados do escoamento superficial ou a partir dos extravasamentos simulados com modelos da rede de coletores. Apesar de ter sido concebido considerando o escoamento em regime rápido, o método mostrou-se válido para um conjunto diversificado de condições de escoamento, tanto em regime rápido como lento, exceto para situações de variação rápida do regime de escoamento.

Palavras-Chave: inundações, critérios de segurança, drenagem urbana, incerteza, método expedito.

doi: 10.22181/aer.2025.0102

* Autor para correspondência
E-mail: ldavid@lneec.pt

An expedited method to assess compliance with people safety criteria in flooded streets

Luís Mesquita David^{a,}, Rita Fernandes de Carvalho^b*

^aLNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

^bMARE, Department of Civil Engineering, University of Coimbra, 3030-788 Coimbra, Portugal

ABSTRACT

The product of flood depth and velocity (hV) has been the most widely used criterion for defining stability thresholds for people and vehicles in flooding conditions. In most cases, safety criteria have limited hV to values between 0.4 and 0.5 m²/s, although recent studies propose a reduction down to 0.22 m²/s in urban areas. In this paper, an expedited method is presented to verify compliance with pre-established thresholds of the hV product based solely on the flood flow rates in streets (that is, without directly knowing h and V) and on easily quantifiable characteristics of the street. Flood flow rates can be estimated using simplified runoff models or derived from simulated overflows in sewer network models. Despite being conceived for supercritical flow, the method proved valid for a diverse set of flow conditions, including both supercritical and subcritical flow, except for rapidly varying flow conditions.

Keywords: flooding, safety criteria, urban drainage, uncertainty, expedited method.

doi: 10.22181/aer.2025.0102

* Corresponding author
E-mail: l david@lnec.pt

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem crescido a preocupação com o risco de inundações nas cidades. Por um lado, a expansão urbana, a impermeabilização do solo e as alterações climáticas têm levado ao aumento dos caudais pluviais. Por outro, há uma maior consciência da necessidade da preparação para fazer frente a chuvadas com elevados períodos de retorno, isto é, a eventos que excedem a capacidade de transporte dos coletores. Nesse sentido, têm sido feitos esforços para avaliar o risco das inundações no espaço urbano e para encontrar soluções para as acomodar (David, 2019).

Dado que, durante as inundações urbanas, as ruas funcionam como uma rede de drenagem superficial, tem sido desenvolvida investigação experimental e teórica para estabelecer critérios de segurança para os transeuntes. Esses critérios devem ser diferentes dos usados para as cheias fluviais. Shand et al. (2011) e Russo et al. (2013) reveem várias expressões propostas para o limiar de estabilidade de pessoas e viaturas face às inundações em arruamentos urbanos. Cada vez mais, algumas dessas expressões vão sendo incluídas em guiões de projeto, manuais de boas práticas, normas e especificações municipais (Balmforth et al., 2006; Melbourne Water, 2015).

Essas expressões geralmente estabelecem limites para a profundidade da inundação (h) e para a velocidade da inundação (V), ou para uma relação entre essas duas variáveis. Na maioria dos casos, o produto das profundidades e velocidades da inundação (hV) é limitado a valores entre 0,4 e 0,5 m²/s. No entanto, estudos recentes têm enfatizado a necessidade de se usarem limites inferiores para as áreas urbanas. Chanson e Brown (2018) recomendam valores abaixo de 0,3 m²/s e Martinez et al. (2016) propõem o limiar de 0,22 m²/s.

No entanto, a determinação da velocidade e da profundidade da inundação exige modelos determinísticos do escoamento superficial, que são complexos e requerem dados de elevada precisão.

Neste artigo apresenta-se um método expedito que permite verificar limiares pré-estabelecidos de hV a partir unicamente dos caudais de inundação em arruamentos. Esses caudais podem ser estimados por métodos simplificados ou pelos caudais extravasados em modelos da rede de coletores. O método foi concebido para escoamentos rápidos, mas foi validado para um conjunto diversificado de escoamentos em regime lento (David e Carvalho, 2021).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A forma da secção transversal da maioria dos arruamentos assemelha-se ao esquema da esquerda da Figura 1. Esta secção transversal e outras variantes de secções compostas podem ser representadas, de forma mais simples, por uma secção transversal triangular-retangular equivalente, conforme representado no esquema central da Figura 1.

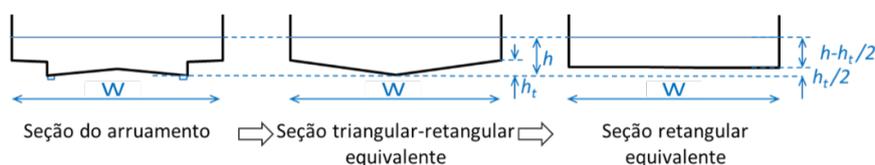


Figura 1. Perfil transversal do arruamento (David, 2019)

A lei de resistência do escoamento turbulento rugoso de água pode ser representada pela fórmula de Manning-Strickler (Eq. 1):

$$V/(K\sqrt{S}) = Q/(AK\sqrt{S}) = R^{2/3} = (A/P)^{2/3} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que V é a velocidade média na secção transversal ao escoamento, Q é o caudal, K é o coeficiente de rugosidade de Strickler, S é o declive longitudinal da base do arruamento, R é o raio hidráulico; A é a área da secção transversal do escoamento e P é o perímetro molhado.

Na maioria dos casos práticos, a largura da secção transversal do arruamento é significativamente superior à profundidade da inundação ($L \gg h$). Isto significa que:

- I. se a secção transversal de escoamento for retangular, o raio hidráulico corresponde à profundidade da inundação ($R \approx h$);
- II. se a secção transversal for triangular, o raio hidráulico corresponde a metade da profundidade da inundação ($R \approx h/2$);
- III. se a secção for triangular-retangular com altura da parte triangular (h_t) inferior à profundidade da inundação (h) (perfil ao centro da Figura 1), o caudal e a velocidade média de escoamento nessa secção são iguais ao caudal e à velocidade média numa secção retangular com a mesma largura e altura $h_{eq} = h - h_t/2$ (perfil da direita da Figura 1).

Para o estabelecimento do método expedito vai-se utilizar a seguinte metodologia:

- Consideração do escoamento numa secção triangular-retangular para toda a gama viável de declives transversais da base triangular (ou de valores de h_t): desde o declive nulo, que corresponde a uma secção retangular ($h_t=0$), até um declive suficientemente elevado em que todo o escoamento passa a ocorrer apenas na parte triangular ($h=h_t$).
- Utilização do conceito da secção retangular equivalente para obtenção de relações analíticas e gráficas entre h_t , $K\sqrt{S}$ e Q que verificam a condição $hV \leq \lim A$, para diferentes valores de $\lim A$ entre 0,22 e 0,5 m²/s.
- Estabelecimento de curvas de regressão para as relações anteriores e, de seguida, de uma expressão única que permita avaliar o cumprimento do critério $hV \leq \lim A$ apenas com base no conhecimento do caudal, i.e., sem o conhecimento direto de h e de V .

3 RESULTADOS

3.1 Expressões analíticas para h , V e Q/W

No Quadro 1 apresentam-se as fórmulas de h , V e Q/W para a condição do critério A, para as secções retangular, triangular e composta (Eq. 2 a Eq. 12). Uma discussão mais aprofundada sobre estas fórmulas e as de outro método é apresentada em David (2019).

Quadro 1. Fórmulas de h , V e Q/W que verificam o critério (adaptado de David, 2019)

| | | |
|---|--|----------|
| Secção retangular | $h \leq \lim A (K\sqrt{S})^{-3/5}$ | (Eq. 2) |
| | $V \leq \lim A^{2/5} (K\sqrt{S})^{3/5}$ | (Eq. 3) |
| | $Q/W \leq \lim A$ | (Eq. 4) |
| Secção triangular | $h \leq 2^{2/5} \lim A^{3/5} (K\sqrt{S})^{-3/5}$ | (Eq. 5) |
| | $V \leq 2^{-2/5} \lim A^{2/5} (K\sqrt{S})^{3/5}$ | (Eq. 6) |
| | $Q/W \leq \lim A/2$ | (Eq. 7) |
| Secção triangular-retangular | Válida se $h_t \leq 2^{2/5} \lim A^{3/5} (K\sqrt{S})^{-3/5}$ | (Eq. 8) |
| | Cálculo iterativo: | |
| | $h \leq \lim A (K\sqrt{S})^{-1} (h - h_t/2)^{-2/3}$ | (Eq. 9) |
| | $V \leq \lim A/h$ | (Eq. 10) |
| | $Q/W \leq \lim A (h - h_t/2)/h$ | (Eq. 11) |
| Se a Eq. 8 não for válida, o escoamento dá-se só na parte inferior triangular, logo: | | |
| | $Q/W \leq 2^{-3/5} \lim A^{8/5} (K\sqrt{S})^{-3/5} h_t^{-1}$ | (Eq. 12) |

3.2 Variação de Q/W em função de h_t e de $K\sqrt{S}$

O gráfico da Figura 2 representa a variação de Q/W em função da altura da secção triangular da base da secção composta (h_t), para diferentes valores de $K\sqrt{S}$ e para $h.V = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$. O eixo das ordenadas corresponde à situação da secção retangular ($h_t = 0$).

Este gráfico permitir avaliar a redução significativa de Q/W com o efeito combinado do aumento de h_t e do aumento de $X = K\sqrt{S}$ (ou do declive, para valores de K idênticos).

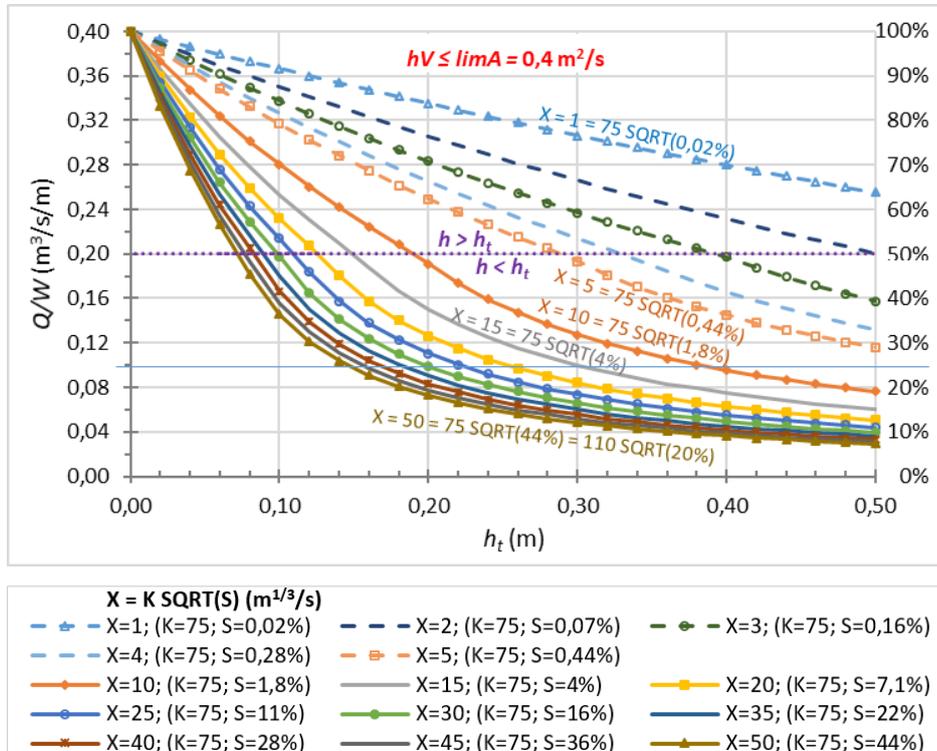


Figura 2. Variação Q/W em função de h_t para diferentes valores de $K \cdot \sqrt{S}$

3.3 Equação de regressão para obtenção de Q/W

Obteve-se a equação de regressão dos valores de Q/W para a secção transversal triangular-retangular, em função de h_t , de $X = K\sqrt{S}$ e de $limA$ (Eq. 13).

$$Q/W = 1/(a_2 X^2 h_t^3 + (b_1 X + b_0) h_t^2 + (c_2 X^2 + c_1 X + c_0) h_t + 1/limA) \quad (\text{Eq. 13})$$

Os valores dos coeficientes a_i , b_i e c_i são obtidos em função de $limA$, através de equações do tipo $a_2 = 0,023 limA^{-2.867}$, que se apresentam em David e Carvalho (2021). Estas equações apresentam erros de regressão inferiores a $\pm 3,3\%$ dentro das seguintes condições:

$$h_t \leq 0,5 \text{ m}, 1 \text{ m}^{1/3}/s \leq X = K\sqrt{S} \leq 50 \text{ m}^{1/3}/s \text{ e } 0,22 \text{ m}^2/s \leq limA = K\sqrt{S} \leq 0,5 \text{ m}^2/s.$$

3.4 O método expedito

O cálculo de Q/W pode ser facilmente implementado numa folha de cálculo, em função do valor pré-estabelecido para $limA$ e dos valores de h_t e $X = K\sqrt{S}$ em cada rua, bastando utilizar a Eq. 13 ou a Eq. 12, consoante a Eq. 8 seja válida ou não, respetivamente.

Assim, se se dispuser de uma estimativa dos caudais máximos de inundação, obtida a partir de modelos mais ou menos simplificados do escoamento superficial ou do extravasamento da rede de coletores, estas 3 equações são suficientes para fornecer as larguras mínimas das ruas (W_{min}) que atendem ao critério $hV \leq limA$, para um valor de $limA$ pré-estabelecido.

3.5 Validação do método

As expressões apresentadas foram deduzidas considerando escoamento em regime rápido, para as gamas de valores de h_t , de $X = K\sqrt{S}$ e de $limA$ indicadas na secção 4.3.

Não obstante, esta metodologia foi testada em um caso de estudo hipotético, em que se utilizou um modelo hidrodinâmico para simular o escoamento na rede de coletores e das inundações nos arruamentos de um sistema complexo. A aplicação da metodologia permitiu obter resultados bastante aceitáveis para um conjunto diversificado de situações de regime lento, e de alternância entre os regimes rápido e lento (David e Carvalho, 2021). Para praticamente todos os arruamentos do caso de estudo, tanto com regime rápido como com regime lento, a largura do arruamento (W) calculada com base nos resultados de Q e de hV obtidos da simulação foi bastante próxima da largura considerada no modelo hidrodinâmico. No entanto, obtiveram-se valores de W superiores, com algum significado, nos trechos de transição do regime rápido para lento, e valores de W inferiores nos trechos de transição do regime lento para o rápido (em princípio, devido ao efeito da passagem pelo regime crítico, neste último caso).

4 Conclusões

O perfil da secção transversal das ruas desempenha um papel relevante no cumprimento dos critérios de segurança face a inundações, que é quantificado gráfica e analiticamente neste trabalho. Por exemplo, uma rua com declive longitudinal de 1,5%, $K \approx 75 \text{ m}^{1/3}/s$ e secção transversal retangular cumpre o limiar $hV = 0,4 \text{ m}^2/s$ para o dobro do caudal de uma rua com a mesma largura, mas com uma secção transversal convencional e $h_t = 0,2 \text{ m}$. O caudal é quatro vezes superior para uma rua com declive de 16% (Figura 2).

É apresentado um método para verificação analítica e expedita do cumprimento de critérios de segurança das pessoas face ao risco de inundações em arruamentos. O método permite a estimativa da largura mínima da via (W_{min}) que assegura o cumprimento do critério de segurança $hV \leq limite$ apenas com base no conhecimento do caudal de inundação (Q) e de características facilmente quantificáveis do arruamento ($K\sqrt{S}$ e h_t).

O método revelou-se válido para a maioria das condições de escoamento, tanto em regime rápido como lento, exceto para situações de variação rápida do regime de escoamento.

AGRADECIMENTOS

Parte deste trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto SINERGEA (ANI, Projeto n.º 33595), financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através dos Programas Operacionais POR Lisboa2020 e CrescAlgarve2020.

REFERÊNCIAS

- Balmforth D., Digman C., Kellagher R., Butler D. (2006). *Designing for exceedance in urban drainage – good practice*. CIRIA C635, London, UK.
- Chanson H., Brown R. (2018). Stability of Individuals during Urban Inundations: What Should We Learn from Field Observations? *Geosciences* 8(9), 341. doi: 10.3390/geosciences8090341.
- David L.M. (2019). Projetar para inundações – efeito do perfil, rugosidade e declive das ruas nos critérios de segurança. *Águas&Resíduos* IV(4), 37-47. doi: 10.22181/aer.2019.0404.
- David L.M., Carvalho R.F. (2021). Designing for People’s Safety on Flooded Streets: Uncertainties and the Influence of the Cross-Section Shape, Roughness and Slopes on Hazard Criteria. *Water* 13(15), 2119. doi: 10.3390/w13152119.
- Martínez-Gomariz E., Gómez M., Russo B. (2016). Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. *Nat Hazards* 82, 1259-1278. doi: 10.1007/s11069-016-2242-z.
- Melbourne Water (2015). Standards and specifications. Design. General guidance. Melbourne, Australia. Guideline General approach to drainage systems e Guideline Floodway safety criteria. <https://www.melbournewater.com.au/planning-and-building/developer-guides-and-resources/standards-and-specifications>, acessado a 14 de outubro de 2022.
- Russo B., Gómez M., Macchione F. (2013). Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas. *Natural Hazards* 69, 251-265. doi: 10.1007/s11069-013-0702-2.
- Shand T.D., Smith G.P., Cox R.J., Blacka M.J. (2011). Development of Appropriate Criteria for the Safety and Stability of Persons and Vehicles in Floods. In Proc. 34th IAHR Conf. Brisbane, Australia, 9 p.