

EQUAÇÕES DE PERDA DE CARGA PARA DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICOS EM PROJETOS DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADA

José Sebastião Costa de Sousa¹

RESUMO

No dimensionamento hidráulico dos projetos de irrigação, por conta das dificuldades de emprego da equação universal de perda de carga, é comum o uso de equações empíricas. Neste trabalho buscou-se avaliar a exatidão das equações de Hazen-Williams, Flamant, Fair-Whipple-Hsiao e Scobey em comparação com a equação universal (Darcy-Weisbach) em situações corriqueiras de projetos de irrigação (velocidades de fluxo de até 4,00 m s⁻¹, tubulações de PVC e polietileno com diâmetros nominais de 13 a 200 mm). O método de avaliação adotado foi o do erro percentual. Observou-se que a equação de Flamant, com coeficiente de atrito de 0,000127, foi a que apresentou os menores erros para tubulações de até 75 mm diâmetro com qualquer velocidade de fluxo, e a partir deste diâmetro a equação de Hazen-Williams (com coeficiente de atrito de 155) é a mais indicada. A equação de Scobey não apresentou resultados satisfatórios nos cenários testados e a equação de Fair-Whipple-Hsiao apresentou-se semelhante à de Hazen-Williams para tubulações com diâmetros maiores que 150 mm combinada a velocidades superiores a 3,00 m s⁻¹. Recomenda-se, portanto, o uso das equações de Flamant e Hazen-Williams, respeitando as condições supracitadas, para o dimensionamento hidráulico de projetos de irrigação pressurizada.

Palavras-chave: equação universal, Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Flamant, coeficiente de atrito

HEAD LOSS EQUATIONS FOR HYDRAULIC SIZING IN PRESSURIZED IRRIGATION PROJECTS

ABSTRACT

In the hydraulic dimensioning of irrigation projects, due to the difficulties of using the universal equation of head loss, it is common the use of empirical equations. In this work, the accuracy of the Hazen-Williams, Flamant, Fair-Whipple-Hsiao and Scobey equations was compared to the universal equation (Darcy-Weisbach) in regular irrigation project situations (flow velocities up to 4.00 m s⁻¹, PVC and polyethylene pipes with nominal diameters from 13 to 200 mm). The method of evaluation adopted was the percentage error. It was observed that the Flamant equation, with coefficient of

¹ Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração: Irrigação e Drenagem, professor do *Campus* Petrolina Zona Rural, IFSERTÃO-PE, endereço institucional: PE 647, Km 22, PISNC N-4, Zona Rural, Cx. Postal 277, CEP 56.302-970, Petrolina/PE, Brasil, e-mail: sebastiao.costa@ifsertao-pe.edu.br, fone: 87 2101-8050.

friction of 0.000127, was the one that presented lower errors for pipes of up to 75 mm diameter with any flow velocity, and from this diameter the Hazen-Williams equation (with coefficient of friction of 155) is the most indicated. The Scobey equation did not present satisfactory results in the scenarios tested and the Fair-Whipple-Hsiao equation was similar to Hazen-Williams equation for pipes with diameters over than 150 mm combined at velocities above than 3.00 m s⁻¹. It is recommended, therefore, the use of the equations of Flamant and Hazen-Williams, respecting the abovementioned conditions, for the hydraulic design of pressurized irrigation projects.

Keywords: universal equation, Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Flamant, coefficient of friction

INTRODUÇÃO

Na atividade agrícola o conhecimento dos processos hidráulicos de condução de água se faz necessário em diversas áreas, especialmente na irrigação.

Nesta, o sucesso do empreendimento depende, dentre outros, da qualidade e da execução do projeto de irrigação (SOUSA; DANTAS NETO, 2014).

Referente à elaboração do projeto, que na irrigação pressurizada (ou condução forçada), consiste em selecionar tubulações, layout e sistema de bombeamento (GOMES, 1999), o projetista tem de decidir qual equação de perda de carga usar. Esta decisão pode acarretar erros significativos, já que os cálculos de perda de carga são imperativos na definição dos diâmetros das tubulações e, por conseguinte, em toda a estrutura hidráulica do projeto. Existem diversas equações de perda de carga indicadas para o dimensionamento hidráulico de tubulações em condução forçada, algumas empíricas, a citar Flamant, Hazen-Williams, Scobey e Fair-Whipple-Hsiao, que tem por características a simplicidade de cálculo e aplicação a cenários específicos (AZEVEDO NETTO et al., 1998). E sobrepondo-se a estas, em termos de exatidão nos valores gerados e abrangência de aplicação, têm-se a equação universal de perda de carga ou equação de Darcy-Weisbach (ALAZBA; ELNESR, 2011).

A equação universal, para as situações comumente empregadas em projetos de irrigação pressurizada, apresenta um dificultador, o fator de atrito “f” que é implícito (SOUSA; DANTAS NETO, 2014), e por este motivo é de determinação laboriosa e suscetível a erros (SILVA et al., 2016).

Além do artifício computacional, outra estratégia usada pelos projetistas para contornar esta dificuldade é recorrer às equações empíricas, e nestes casos, há necessidade de definir quando e como usá-las. Com este propósito, Mello e Carvalho (1998) adaptaram o coeficiente de Hazen-Williams, a partir da equação universal, gerando coeficientes de atrito variáveis; um avanço, já que normalmente são adotados como constante. Segundo os autores, com as adaptações houve aumento expressivo na exatidão do modelo. Também se apontam casos em que as equações sem ajustes geram resultados satisfatórios, Torres et al. (2013), por exemplo, usando equações de perda de carga de Darcy-Weisbach, Scobey, Flamant e Manning, para estimar a velocidade de fluxo em tubulações de 100 mm de diâmetro, não verificaram variações apreciáveis das estimativas com os dados experimentais, apontando, a aplicabilidade das equações. No entanto, existe a necessidade de analisar, cautelosamente, quais situações exigem um ou outro modelo, que represente o fenômeno, para usá-lo com maior probabilidade de acerto.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a exatidão das equações de Hazen-Williams, Flamant, Fair-Whipple-Hsiao e Scobey em comparação com a equação universal de perda de carga, para situações comuns de projetos de irrigação, e indicar qual equação usar e em quais situações.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho consistiu de simulações computacionais para cenários comuns de

ocorrência em projetos de irrigação pressurizada. Adotou-se a associação de 37 valores de velocidade de fluxo, iniciando em $0,40 \text{ m s}^{-1}$ com incrementos de $0,10 \text{ m s}^{-1}$ até a velocidade de $4,00 \text{ m s}^{-1}$, com 12 diâmetros internos de tubulações de PVC e polietileno (13,00, 16,10, 20,60, 35,70, 48,10, 72,50, 97,60, 120,00, 144,00 e 193,00 mm, referentes, respectivamente aos diâmetros nominais 13, 16, 20, 35, 50, 75, 100, 125, 150 e 200 mm), que configuram inteiramente os principais quadros de projetos de irrigação sob pressão. Abordou-se ainda, casos excepcionais de adutoras de grandes projetos, com simulações para diâmetros internos de até 1.000 mm, gerando no total 592 cenários de simulação.

Para cada cenário foi determinada a perda de carga unitária a partir das equações de Darcy-Weisbach, ou equação universal de perda de carga (equação 1), Hazen-Williams (equação 2), Flamant (equação 3), Fair-Whipple-Hsiao (equação 4) e Scobey (equação 5). Tais equações foram obtidas dos trabalhos de Williams e Hazen (1933), Azevedo Netto et al. (1998), Khiry et al. (2014), Rettore Netto et al. (2016) e Radhakrishna et al. (2017).

$$J = \left(\frac{8}{g \cdot \pi^2} \right) \cdot f \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad (1)$$

$$J = 10,67 \cdot \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \quad (2)$$

$$J = \frac{4^{2,75}}{\pi^{1,75}} \cdot b \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (3)$$

$$J = 8,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{(1000 \cdot Q)^{1,75}}{(1000 \cdot D)^{4,75}} \quad (4)$$

$$J = \frac{K_s}{387} \cdot \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi} \right)^{1,9} \cdot \frac{1}{D^{4,9}} \quad (5)$$

Em que: J – perda de carga unitária, m m^{-1} ; g – aceleração da gravidade (adotada $9,80 \text{ m s}^{-2}$); π – pi; f, C, b e K_s – coeficientes de atrito de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Flamant e Scobey, respectivamente; Q – vazão

conduzida, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Equação 6); D – diâmetro interno da tubulação, m.

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V \quad (6)$$

Em que: V – velocidade de fluxo, m s^{-1} .

Para o cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach fez-se uso de um processo iterativo computacional para execução da equação de Von Kármán (equação 7), uma vez que, para todos os cenários testados, o regime de fluxo foi sempre classificado como turbulento liso, situação também constatada por Sousa e Dantas Neto (2014).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log(\text{Rey} \cdot \sqrt{f}) - 0,8 \quad (7)$$

Em que: Rey – número de Reynolds (equação 8), adimensional.

$$\text{Rey} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu} \quad (8)$$

Em que: ν – viscosidade cinemática da água (adotada como sendo $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

Em um primeiro momento foram feitas simulações para ajustar o coeficiente de atrito de cada equação empírica com a equação universal, em seguida, com os coeficientes ajustados, as perdas de carga geradas pelas equações de 2 a 5 foram comparadas as da equação 1.

O teste de comparação adotado foi o erro percentual (Equação 9), que neste caso foi suficiente para expressar o potencial das equações já que nenhuma regressão foi ajustada aos modelos pré-existentes (LIMA JUNIOR et al., 2018).

$$E = \frac{|VT - VR|}{VR} \cdot 100 \quad (9)$$

Em que: E – erro percentual, %; VT – valor teórico (gerado pelas equações empíricas), VR

– valor real (gerado pela equação de Darcy-Weisbach).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Das simulações realizadas para obtenção dos melhores coeficientes de atrito das equações empíricas, observou-se para a de

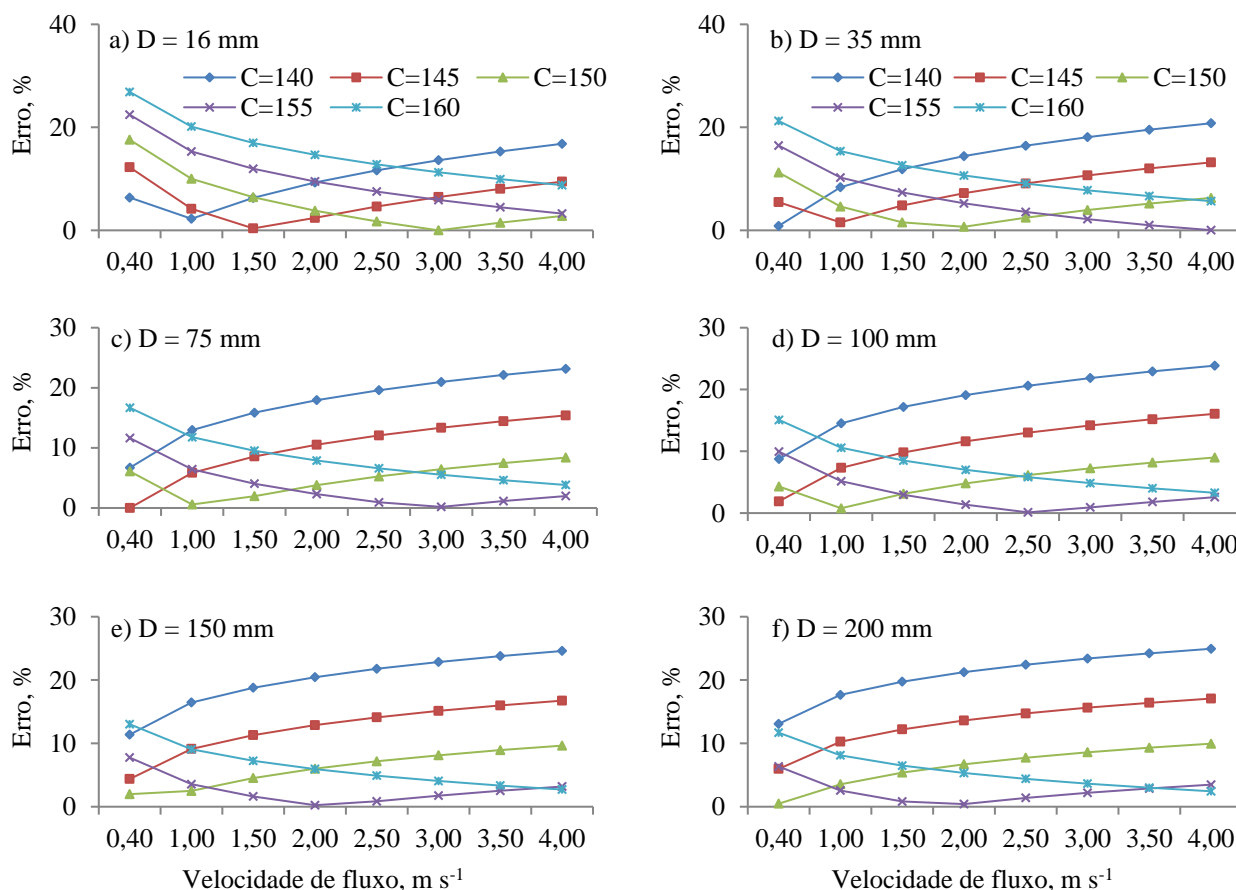


Figura 1. Erro percentual da perda de carga unitária gerada a partir da equação de Hazen-Williams, em comparação com a equação universal, para diversos coeficientes de atrito e tubulações com diâmetros nominais de 16 (a), 35 (b), 75 (c), 100 (d), 150 (e) e 200 mm (f).

A variabilidade nos diâmetros pequenos (inferiores a 75 mm) já era esperada, pois segundo Porto (2006) o uso da equação de Hazen-Williams se restringe a diâmetros superiores a 4 polegadas (100 mm) com C de 150 para tubos extrudados e de PVC.

Gomes (1999), por sua vez, a indica para diâmetros acima de 3 polegadas, com valores de 145 e 150 (tubos de PVC e polietileno, respectivamente), e no trabalho original, Williams e Hazen (1933), as maiores citações são para tubos com diâmetros superiores a 3

Hazen-Williams que o coeficiente de atrito (C) nos diâmetros inferiores a 75 mm é bastante variável e não há unanimidade no valor adotado que represente uma faixa de velocidade (Figuras 1a e 1b). Contudo, a partir de 75 mm (Figuras 1c a 1f) o valor de C igual a 155 é o que gera os menores erros, especialmente para velocidades acima de 1,00 m s⁻¹ (erros menores que 4%).

polegadas. De modo que, caso seja a pretensão usar a equação de Hazen-Williams para diâmetros inferiores a 75 mm, deve-se adotar valores de C em função da velocidade do fluxo e do diâmetro da tubulação, não cabendo neste trabalho tais indicações já que se busca para estes casos, o apontamento de outros modelos.

As recomendações do valor de C de Hazen-Williams, aqui sugeridas, corroboram com os resultados alcançados por Allen (1996), C de 145 a 155 para projeto de

EQUAÇÕES DE PERDA DE CARGA PARA DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICOS EM PROJETOS DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADA

irrigação pressurizada com velocidades de fluxo acima de $1,00 \text{ m s}^{-1}$, Alazba e Elnesr (2011) e Elyamany e El-Nashar (2015), C de 150 a 155 para tubos de PVC e Stefopoulou e Dercas (2017) valor de C igual a 150 para tubos lisos em geral. Já para Radhakrishna et al. (2017) o valor de C para tubos de PVC está compreendido entre 140 a 180. Valores de C

superiores a 155 só geraram erros pequenos para velocidades de fluxo acima de $3,00 \text{ m s}^{-1}$ com diâmetros superiores a 150 mm (Figuras 1e e 1f), e para os diâmetros ainda maiores, de 250 a 1.000 mm o valor de C de 155 continua sendo o mais indicado (Figura 2), com erros inferiores a 3% para velocidades de fluxo de $1,00$ a $3,00 \text{ m s}^{-1}$.

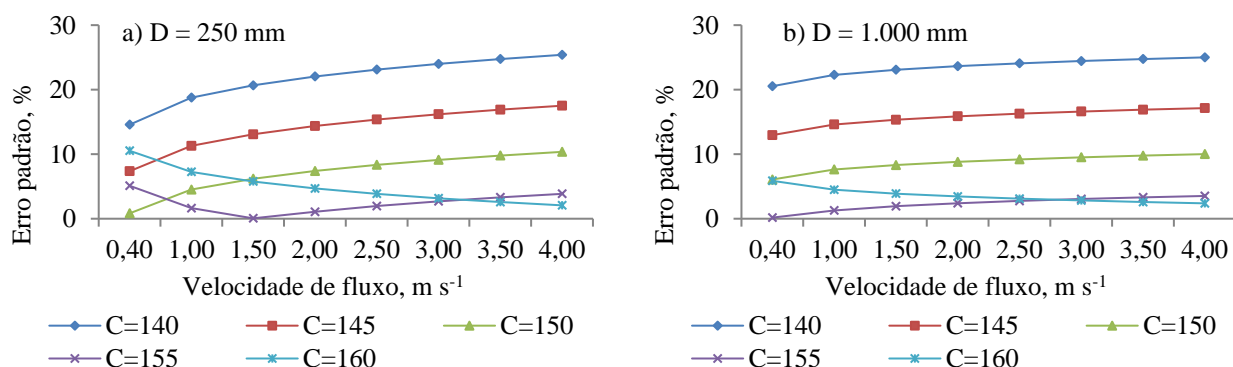
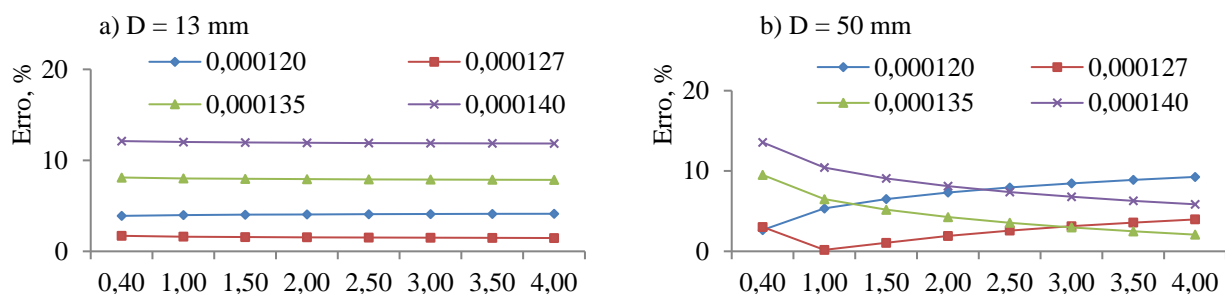


Figura 2. Erro percentual da perda de carga unitária gerada a partir da equação de Hazen-Williams, em comparação com a equação universal, para diversos coeficientes de atrito (C) e tubulações com diâmetros nominais de 250 (a) e 1.000 mm (b).

Para a equação de Flamant o valor do coeficiente de atrito, b igual a 0,000127 foi o que gerou os menores erros, inferiores a 3%, para velocidades de até $3,00 \text{ m s}^{-1}$, e diâmetros inferiores a 75 mm (Figuras 3a e 3b), sobressaindo-se ao valor de 0,000120, erros de até 9%, recomendado por Azevedo Netto et al. (1998).

Caso particular na avaliação da equação de Flamant está na sua equivalência à equação universal quando o fator de atrito desta é

calculado a partir da fórmula de Blasius ($f = 0,316 \cdot \text{Reynolds}^{-0,25}$), decompondo-a, a equação universal com f de Blasius, chega-se aos mesmos expoentes dos termos de vazão e diâmetro da equação de Flamant com fator de atrito (b) igual a 0,000127. Assim sendo, justificam-se os erros crescentes para tubos de 75 mm, pois o número de Reynolds excede 100.000, limite de aplicação da equação de Blasius (PORTO, 2006; STEEN; BRUTSAERT, 2017).



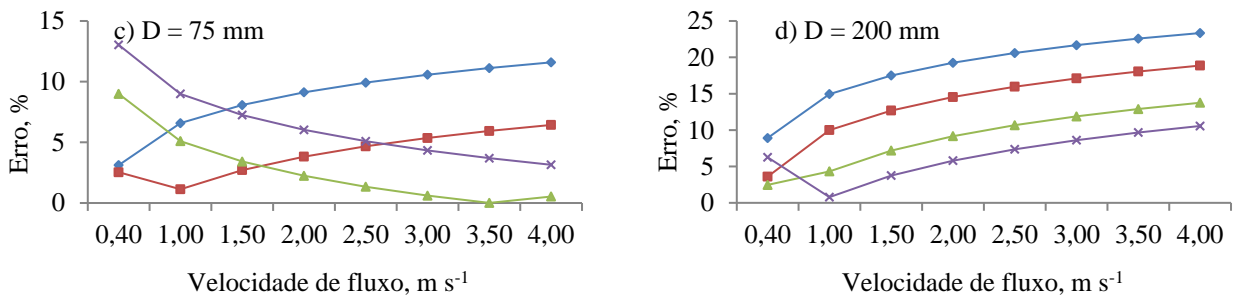


Figura 3. Erro percentual da perda de carga unitária gerada a partir da equação de Flamant com diferentes valores do coeficiente de atrito (b), em comparação com a equação universal, para tubulações com diâmetros nominais de 13 (a), 50 (b), 75 (c) e 200 mm (d).

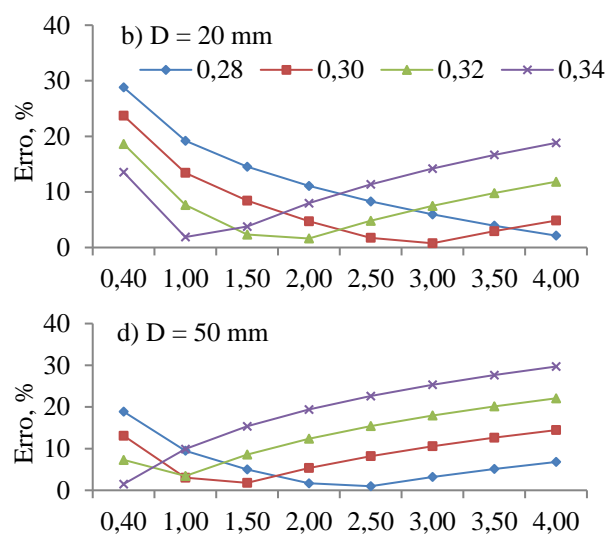
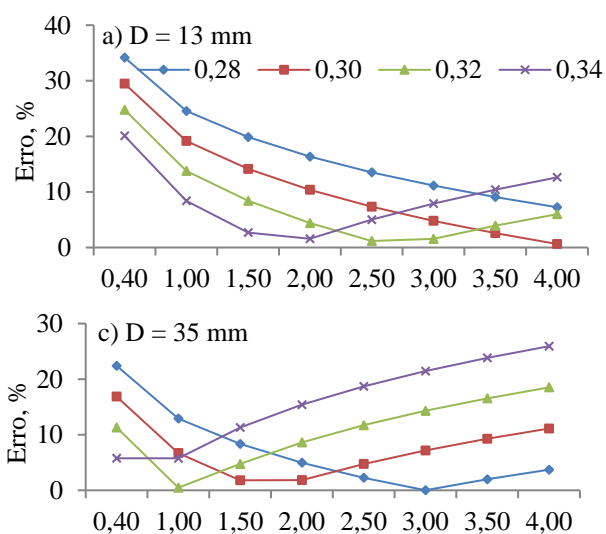
Os erros observados na Figura 3, para o coeficiente de atrito de Flamant de 0,000127 representam exatamente a imprecisão da fórmula de Blasius em comparação com a de Van Kármán na determinação do fator “f” de Darcy-Weisbach.

Estas constatações também foram feitas por Sousa e Dantas Netto (2014) quando apresentaram uma equação explícita para o fator f de Darcy-Weisbach. Evidencia-se, portanto que, a equação de Flamant com o coeficiente de atrito de 0,000127 é válida no mesmo intervalo de número de Reynolds da equação de Blasius (4.000 a 100.000), para tubos lisos conduzindo água limpa em regime de fluxo turbulento liso, situação comum nos projetos de irrigação com tubulações de até 50 mm.

Para diâmetros acima de 75 mm com velocidades superiores a 1,50 m s⁻¹ (Figuras 3c

e 3d) o b de Flamant é crescente e, portanto, necessárias indicações caso a caso.

A equação de Scobey, indicada por Gomes (1999) para diâmetros de até 3 polegadas (casos em que o autor não recomenda a equação de Hazen-Williams), tem seu fator de atrito, Ks, apontado na literatura (GOMES, 1999) como igual a 0,32 para tubos lisos. Na Figura 4 fica evidenciado que não há um padrão de erros para o valor do Ks em nenhum cenário testado. Em casos isolados, diâmetros de 13 a 20 mm e velocidades de fluxo de 1,50 a 2,00 m s⁻¹ (Figura 4a a 4c), foi onde ocorreram os menores erros para o Ks igual a 0,32. O Ks apresenta-se decrescente com o aumento do diâmetro independente da velocidade de fluxo para diâmetros superiores a 50 mm, o que impõe acentuada atenção na utilização da equação de Scobey.



EQUAÇÕES DE PERDA DE CARGA PARA DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICOS EM PROJETOS DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADA

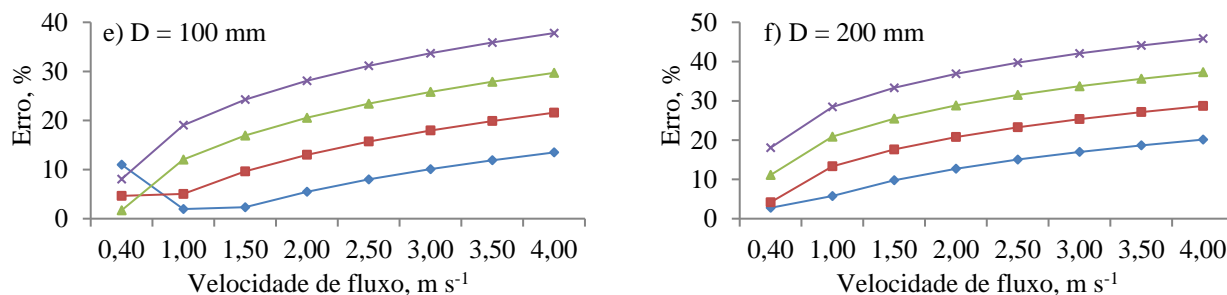
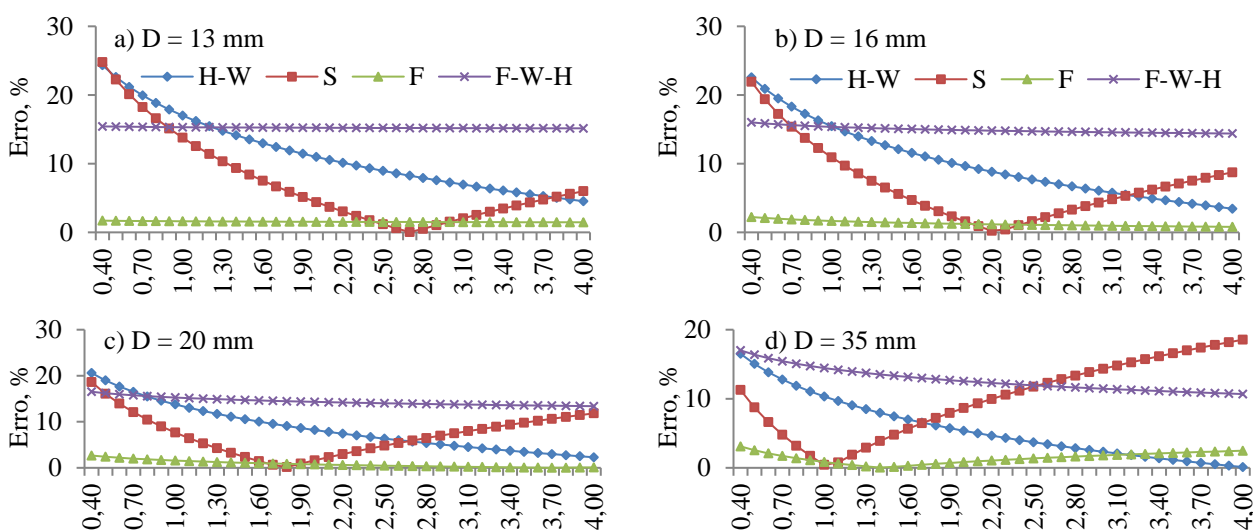


Figura 4. Erro percentual da perda de carga unitária gerada a partir da equação de Scobey com diferentes valores do coeficiente de atrito, em comparação com a equação universal, para tubulações com diâmetros nominais de 16 (a), 20 (b), 35 (c), 50 (d), 100 (e) e 200 mm (f).

Rettore Neto et al. (2016), no entanto, verificando o erro na estimativa da perda de carga contínua em tubos elásticos em função da pressão de entrada de tubulações gotejadoras de polietileno, encontraram os menores erros para a equação de Scobey, usando K_s de 0,32, em comparação com as equações de Manning e Fair-Whipple-Hsiao. Os autores atribuíram as variações nas estimativas da perda de carga na tubulação (que chegaram aos 78%) aos incrementos de diâmetro na tubulação com o aumento da pressão. Como se sabe a influência do diâmetro no cálculo da perda de carga é aproximadamente igual à quinta potência (AZEVEDO NETTO, 1998). Então os erros cometidos com a adoção do K_s foram compensados pela dilatação da tubulação. Além disso, os erros observados por Rettore

Neto et al. (2016), foram de superestimação da perda de carga (atestando o comentário da dilatação do tubo) e nas curvas da Figura 4, por terem, os erros, sido calculados em módulo (valor positivo) o ponto de inflexão corresponde ao momento em que ocorre a passagem dos mesmos de negativos para positivos, portanto, a equação de Scobey geralmente (para diâmetros inferiores a 50 mm) conduz a valores subestimados da perda de carga na tubulação, mostrando coerência entre os resultados observados neste trabalho e os aferidos por Rettore Neto et al. (2016).

Com os valores definido para os coeficientes de atrito das equações empíricas (155, 0,000127 e 0,32 para as expressões de Hazen-Williams, Flamant e Scobey, respectivamente) geraram-se as comparações apresentadas na Figura 5.



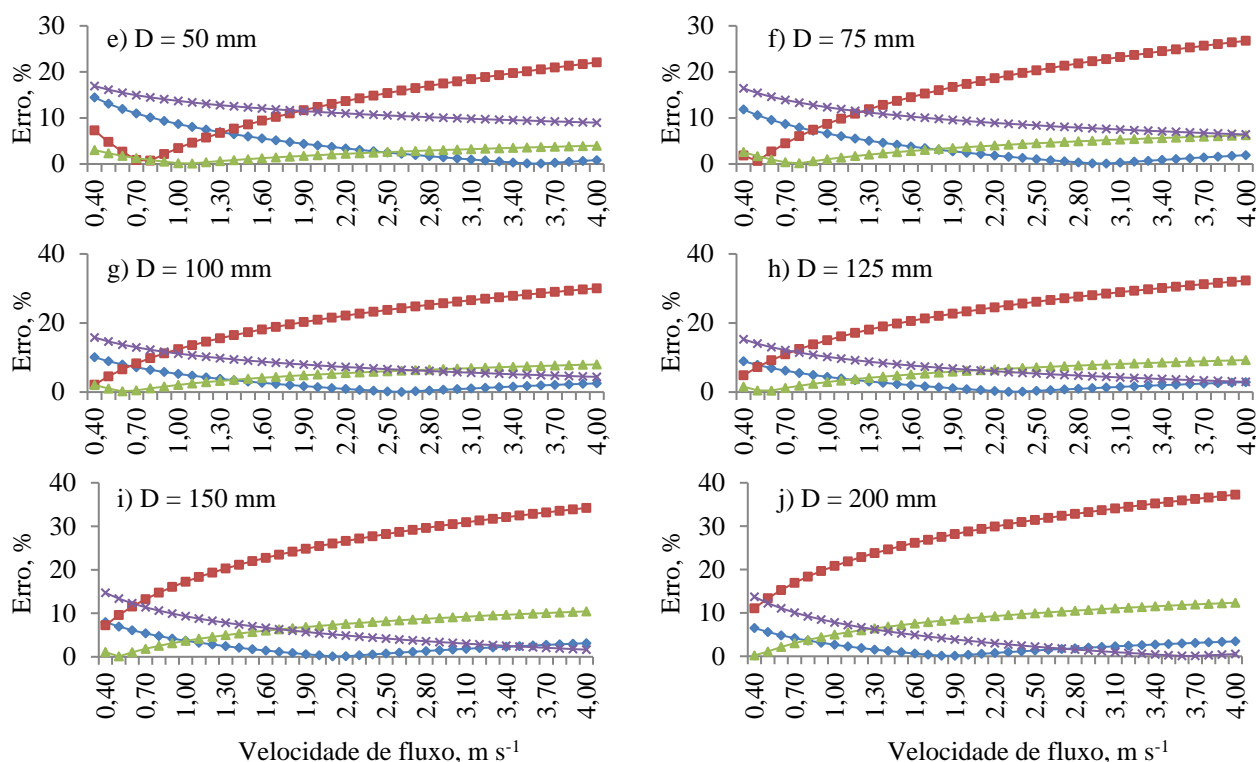


Figura 5. Erro percentual da perda de carga unitária gerada a partir das equações de Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Flamant (F) e Fair-Whipple-Hsiao (F-W-H) em comparação com a equação universal, para tubulações com diâmetros nominais de 13 (a), 16 (b), 20 (c), 35 (d), 50 (e), 75 (f), 100 (g), 125 (h), 150 (i) e 200 mm (j).

Observa-se que a equação de Flamant foi a mais exata (erros de 2%) para os cenários gerados por pequenos diâmetros (menores que 75 mm) independente da velocidade de fluxo (Figuras 5a a 5f). Contudo, para os casos em que a velocidade de fluxo superar, 3,50 m s⁻¹ para diâmetro de 35 mm, 2,50 m s⁻¹ para diâmetro de 50 mm e 2,00 m s⁻¹ para diâmetro de 75 mm, a equação de Hazen-Williams se apresenta com ligeira superioridade, com desvios menores que 2%. Porém, tais casos não representam a realidade dos projetos de irrigação, já que é usual manter a velocidade de fluxo no máximo em 2,00 m s⁻¹ (GOMES, 1999; SOUSA; DANTAS NETO, 2014).

Independente do diâmetro a equação de Flamant continua sendo a mais acurada para as menores velocidades de fluxo (Figura 5). Este fato retrata a faixa de aplicação da equação, que, como já mencionado anteriormente, coincide com a de Blasius, para número de Reynolds de até 100.000 (PORTO, 2006).

A equação de Hazen-Williams torna-se a mais indicada para tubulações de diâmetro superior a 75 mm, ou nos casos em que a

equação de Flamant não se aplica (Figuras 5f a 5j). Nota-se, contudo, que a equação de Fair-Whipple-Hsiao tende a equivaler ou apresentar menores desvios do que a de Hazen-Williams para diâmetros acima de 125 mm e velocidades superiores a 2,80 m s⁻¹. Novamente situações incomuns nos projetos de irrigação.

A equação de Fair-Whipple-Hsiao se comparada a de Flamant é idêntica em termos de expoentes, porém, com diferença no coeficiente. Desse modo, substituindo o valor de 0,000127 na equação 3 (Flamant) gera-se como constante de proporcionalidade o valor 0,00775 contra 0,00863 da equação 4 (Fair-Whipple-Hsiao), ou seja, esta última é, portanto, inadequada na faixa de aplicação da equação de Blasius.

A equação de Fair-Whipple-Hsiao é, no entanto, recomendada pela ABNT para projetos hidráulico-sanitários prediais (PORTO, 2006). Compreensível tal adoção, já que esta é a única equação que sempre superestima a perda de carga na tubulação; não havendo inflexão da curva de erro

(desvios) em nenhum cenário (Figura 5). Neste caso o projeto estará sempre dimensionado a favor da segurança. Para irrigação, no entanto, este superdimensionamento pode acarretar demandas de maior potência instalada e conseqüentemente gastos excessivos com energia elétrica (GOMES, 1999).

A equação de Scobey, com exceção de casos isolados, apresentou-se inferior as demais. O uso dessa equação requer a adoção de coeficiente de atrito específico para cada

caso. Portanto, deve-se evitar sua utilização generalizada para fins de elaboração de projetos de irrigação.

Para os casos extras em projetos de irrigação pressurizados, onde as tubulações têm diâmetros superiores a 200 mm, observou-se que a equação de Hazen-Williams apresentou melhor desempenho, e que a equação Fair-Whipple-Hsiao começa a subestimar (neste caso o formato côncavo da curva remete a erros negativos) a perda de carga (Figura 6).

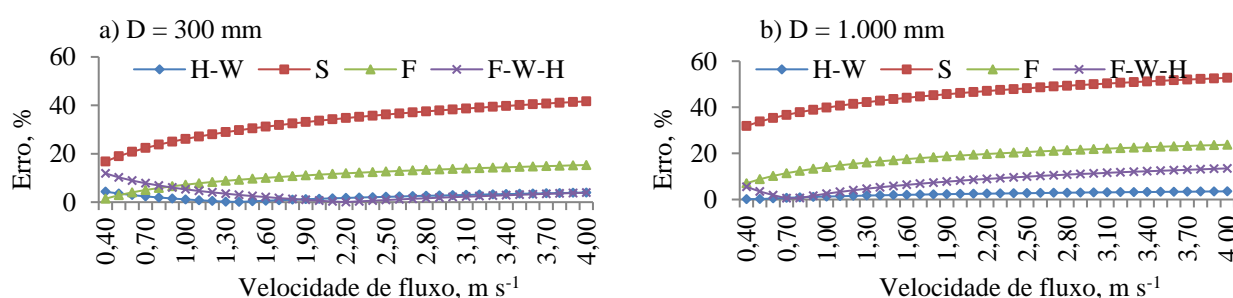


Figura 6. Erro percentual da perda de carga unitária gerada a partir das equações de Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Flamant (F) e Fair-Whipple-Hsiao (F-W-H) em comparação com a equação universal, para tubulações com diâmetros nominais de 300 (a), 1.000 mm (b).

CONCLUSÕES

Nenhuma das equações empíricas de perda de carga avaliadas se apresentou indicadas para a totalidade de cenários testados, quando comparadas a equação universal.

A equação de Scobey mostrou-se imprecisa nos casos avaliados.

A equação de Fair-Whipple-Hsiao apresentou comportamento semelhante à de Hazen-Williams para tubulações de diâmetros superiores a 150 mm com velocidades de fluxo acima de 3,00 m s⁻¹.

A equação de Flamant, com coeficiente de atrito de 0,000127, é a mais indicada para dimensionamento de projetos de irrigação pressurizada em tubulações lisas com diâmetro nominal de até 75 mm. Para diâmetros superiores a 75 mm, recomenda-se a equação de Hazen-Williams com coeficiente de atrito de 155.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAZBA, A. A.; ELNESR, M. B. Simple iterative model for adjusting Hazen-Williams friction coefficient for drip irrigation laterals. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 12, p. 1079-1088, 2011.
- ALLEN, R. G. Relating the Hazen-Williams and Darcy-Weisbach friction loss equations for pressurized irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 12, n. 6, p. 685-693, 1996.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Ed. Blücher, 1998. 670 p.
- ELYAMANY, A. H.; EL-NASHAR, W. Y. Estimating life cycle cost of improved field irrigation canal. **Water Resources Management**, v. 30, n. 1, p. 99-113, 2015.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento**. 3. ed. Campina Grande: Ed. UFPB, 1999. 412p.

KHIRY, S.; MOWFY, M.; EL-NASHAR, W. Selection of drains coverings type in eastern of Egypt. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 3, n. 6, p. 330-338, 2014.

LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D. D.; MACÊDO, K. G.; OLIVEIRA, J. B.; OLIVEIRA, W. C. Espacialização da evapotranspiração de referência por meio da equação Hargreaves e Samani ajustada para o estado do Ceará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 2, p. 2510-2518, 2018.

MELLO, C. R.; CARVALHO, J. A. Análise da equação de perda de carga de Hazen-Williams, associada aos regimes hidráulicos para tubos de PVC e polietileno de pequeno diâmetro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 247-252, 1998.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540 p.

RADHAKRISHNA, A. R.; RAVIKUMAR, A. S.; DUGAD, S. B. A study on hydraulics of underground buried pipe system. **International Journal of Current Research**, v. 9, n. 8, p. 55578-55585, 2017.

RETTORE NETO, O.; TAVARES, V. E. Q.; FARIA, L. C.; KÖPP, L. M.; TIMM, L. C. Comportamento das equações de Scobey,

Manning e Fair-Whipple-Hsiao quando utilizadas para estimativa da perda de carga em tubos com comportamento elástico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 1, p. 420-427, 2016.

SILVA, A. R. C.; JUSTI, A. L.; SAIZAKI, P. M. Software didático para cálculos de sistemas de recalque de água. **Engenharia na agricultura**, v. 24, n. 6, p. 491-504, 2016.

SOUSA, J. S. C.; DANTAS NETO, J. Equação explícita para cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach em projetos de irrigação pressurizada. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, v. 19, n. 1, p. 137-148, 2014.

STEEN, P.; BRUTSAERT, W. Saph and Schoder and the Friction Law of Blasius. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 49, p. 575-582, 2017.

STEFPOPOULOU, A.; DERCAS, N. NIREUS: A new software for the analysis of on-demand pressurized collective irrigation networks. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 140, n. 9, p. 58-69, 2017.

TORRES, R. R.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; ROSSO, R. B.; KOPP, L. M.; BUSKE, T. C.; BEM, L. H. B. Comparação de métodos de estimativa de velocidade de fluxo em tubulações de PVC. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 7, número especial, p. 27-31, 2013.

WILLIAMS, G. S.; A. HAZEN. **Hydraulic Tables**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1933, 104 p.