



## DESEMPENHO E PRECISÃO DE EQUAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA EM REGIME DE FLUXO TURBULENTO

Bruna Dalcin Pimenta<sup>1</sup>, Adroaldo Dias Robaina<sup>2</sup>, Marcia Xavier Peiter<sup>3</sup>, Anderson Crestani Pereira<sup>4</sup>, Silvana Antunes Rodrigues<sup>5</sup>, Marcos Vinicius Loregian<sup>6</sup>

### RESUMO

A equação de Colebrook-White é amplamente utilizada para dimensionamento do coeficiente de perda de carga ( $f$ ) de Darcy-Weisbach, sendo estipulada como padrão. Por ser uma formulação implícita, com soluções iterativas, diversas equações explícitas foram desenvolvidas para calcular o “ $f$ ”. O objetivo desse estudo foi avaliar o desempenho dessas aproximações, através do índice de desempenho ( $Id$ ) e a precisão, através da média do erro relativo (MER), das equações explícitas em relação a implícita padrão, variando-se o intervalo do número de Reynolds de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e da rugosidade relativa de  $10^{-6} \leq \epsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ . As equações de Chen (3), Sonnad e Goudar (8), Buzzelli (9), Vantankhah e Kouchakzadeh (10), Fang et al. (11) e Ofor e Alabi (13) apresentaram elevado  $Id$ , classificando-as como “Excelente” e elevada precisão quando comparadas com a aproximação de Colebrook-White, com MER de 0,35%, 0,52%, 0,34%, 0,36%, 0,43% e 0,3%, respectivamente. Há, portanto, relação entre o desempenho e a precisão das equações analisadas, ou seja, quanto maior o  $Id$  menor será o valor da MER.

**Palavras-Chave:** perda de carga, média do erro relativo, Colebrook-White, Darcy-Weisbach.

## PERFORMANCE AND PRECISION OF EXPLICIT EQUATIONS OF THE LOAD LOSS COEFFICIENT IN TURBULENT FLOW SYSTEM

### ABSTRACT

The Colebrook-White equation is widely used for the design of the Darcy-Weisbach load loss coefficient ( $f$ ) and is stipulated as standard. Because it is an implicit formulation, with iterative solutions, several explicit equations have been developed to calculate the “ $f$ ”. The objective of this study was to evaluate the performance of these approximations, through the performance

<sup>1</sup> Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e-mail: [brunadpimenta@gmail.com](mailto:brunadpimenta@gmail.com)

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Civil, professor titular da UFSM, Dept. Eng. Rural, e-mail: [diasrobaina@gmail.com](mailto:diasrobaina@gmail.com)

<sup>3</sup> Doutora em Engenharia Civil, professora associada da UFSM, Dept. Eng. Rural, e-mail: [mpeiter@gmail.com](mailto:mpeiter@gmail.com)

<sup>4</sup> Graduando em agronomia da UFSM, Dept. Eng. Rural, e-mail: [acrestanipereira@gmail.com](mailto:acrestanipereira@gmail.com)

<sup>5</sup> Doutoranda em Engenharia Agrícola, Dept. Eng. Rural, UFSM, e-mail: [rodrigues.silvana.a@gmail.com](mailto:rodrigues.silvana.a@gmail.com)

<sup>6</sup> Graduando em agronomia da UFSM, Dept. Eng. Rural, e-mail: [vinicius.loregian@hotmail.com](mailto:vinicius.loregian@hotmail.com)

index ( $Id$ ) and the precision, through the mean of the relative error (MER), of the explicit equations in relation to the implicit standard, varying the interval of the number of Reynolds of  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  and the relative roughness of  $10^{-6} \leq \epsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ . The equations of Chen (3), Sonnad and Goudar (8), Buzzelli (9), Vantankhah and Kouchakzadeh (10), Fang et al. (11) and Offor and Alabi (13) presented high  $Id$ , classifying them as "Excellent" and high precision when compared to the Colebrook-White approximation, with MER of 0,35%, 0,52%, 0,34 %, 0,36%, 0,43% and 0,3%, respectively. There is, therefore, a relation between the performance and the accuracy of the analyzed equations, that is, the higher the  $Id$ , the lower the MER value.

**Keywords:** load loss, mean relative error, Colebrook-White, Darcy-Weisbach.

## INTRODUÇÃO

Pesquisas sobre escoamento de fluidos em condutos pressurizados são de grande relevância devido à aplicação em diversos segmentos da engenharia moderna, como sistemas de drenagem, redes de esgoto e abastecimento urbano, energia, indústria, mineração e irrigação (SCHRODER, 2011).

O conhecimento preciso da dissipação de energia que ocorre durante o escoamento é fundamental para o correto dimensionamento de sistemas de irrigação, pois, características hidráulicas de operação, como pressão de escoamento e perda de carga em tubulações afetam a uniformidade de distribuição da água nos sistemas (PROVENZANO; PUMO, 2004).

Para dimensionamento de tubulações pressurizadas, pode-se estimar a perda de carga contínua através de várias formulações. Entre elas, destaca-se a equação de Darcy-Weisbach (1857), válida para qualquer fluido, diâmetro de tubulação e regime de escoamento, que envolve, entre outros parâmetros, um coeficiente de perda de carga, e é expressa pela equação (1):

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

em que  $hf$  é a perda de carga contínua na tubulação (m);  $f$  é o coeficiente de perda de carga (adimensional);  $L$  é o comprimento da tubulação (m);  $D$  é o diâmetro interno da tubulação (m);  $V$  é a velocidade de escoamento do fluido ( $m \cdot s^{-1}$ ) e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m \cdot s^{-2}$ ).

A equação de Colebrook-White (1937) tem sido considerada a mais precisa aproximação para determinação do coeficiente de perda de carga, sendo utilizada como padrão referencial (YOO; SINGH, 2005; HEYDARI et al., 2015; SHAIKH et al., 2015; BRKIĆ; ČOJBAŠIĆ 2016), sendo válida para um amplo intervalo de aplicabilidade:  $2 \times 10^3 < Re \leq 10^8$  e  $0 \leq \epsilon/D \leq 0,05$ . Trata-se de uma formulação implícita, cuja resolução é obtida através de processos iterativos (YILDIRIM, 2009; OFFOR; ALABI, 2016b; BRKIĆ, 2016; BRKIĆ; ČOJBAŠIĆ, 2017) e é representada pela equação (2):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

em que  $f$  é o coeficiente de perda de carga de Darcy-Weisbach (adimensional);  $\epsilon/D$  é a rugosidade relativa da tubulação (m);  $Re$  é o número de Reynolds (adimensional).

Várias aproximações explícitas do coeficiente de perda de carga foram desenvolvidas para substituir o uso da equação padrão implícita de Colebrook-White, variando a precisão e complexidade. Com isso, o objetivo desse trabalho foi verificar o desempenho e a precisão de aproximações explícitas do coeficiente de perda de carga em relação a formulação de Colebrook-White, no regime de fluxo turbulento, abrangendo o intervalo de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \epsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .

## MATERIAL E MÉTODOS

DESEMPENHO E PRECISÃO DE EQUAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA EM REGIME DE FLUXO TURBULENTO

Para a determinação das equações explícitas do coeficiente de perda de carga ( $f$ ) utilizadas nesse estudo a faixa de aplicabilidade do número de Reynolds ( $Re$ ) e rugosidade relativa ( $\varepsilon/D$ ) que cada equação se enquadra foi determinante para escolha das mesmas, pois, para que se aproxime do

intervalo de aplicação que a equação de Colebrook-White fornece, apenas as equações explícitas que abrangem o regime de fluxo turbulento serão consideradas.

A Tabela 1 apresenta as equações encontradas na literatura que satisfazem essa condição.

**Tabela 1.** Equações explícitas do coeficiente de perda de carga com seus respectivos autores, ano de publicação e intervalo de aplicação.

Referência/Nº equação	Ano	Equação explícita do coeficiente “ $f$ ”	Intervalo aplicável
Chen (3)	1979	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7065D} - \frac{5,0452}{Re} \log \left( \frac{1}{2,8257} \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1,1098} + \frac{5,8506}{Re^{0,8981}} \right) \right]$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^8$ $10^{-7} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Round (4)	1980	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,8 \log \left[ \frac{Re}{0,135 Re \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) + 6,5} \right]$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Haaland (5)	1983	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right]$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Tsal (6)	1989	$A = 0,11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{\varepsilon}{D} \right)^{0,25}$ Se $A \geq 0,018$ então $f = A$ Se $A < 0,018$ então $f = 0,0028 + 0,85A$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Romeo et al. (7)	2002	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left\{ \frac{\varepsilon}{3,7065D} - \frac{5,0272}{Re} \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,827D} - \frac{4,567}{Re} \log \left( \left( \frac{\varepsilon}{7,7918D} \right)^{0,9924} + \left( \frac{5,3326}{208,815 + Re} \right)^{0,9345} \right) \right] \right\}$	$3 \times 10^3 \leq Re \leq 1,5 \times 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Sonnad e Goudar (8)	2006	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,8686 \ln \left( \frac{0,4587 Re}{G} \right)$ $G = 0,124 Re \frac{\varepsilon}{D} + \ln(0,4587 Re)$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Buzzelli (9)	2008	$\frac{1}{\sqrt{f}} = B_1 - \left[ \frac{B_1 + 2 \log \left( \frac{B_2}{Re} \right)}{1 + \frac{2,18}{B_2}} \right]$ $B_1 = \frac{[0,774 \ln(Re)] - 1,41}{\left( 1 + 1,32 \sqrt{\frac{\varepsilon}{D}} \right)}$ $B_2 = \frac{\varepsilon}{3,7D} Re + 2,51 B_1$	$3 \times 10^3 \leq Re \leq 1,5 \times 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$

Vantankhah e Kouchakzadeh (10)	2008	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,8686 \ln \left[ \frac{0,4587 \text{Re}}{(S - 0,31) \left( \frac{S}{S+0,9633} \right)} \right]$ $S = 0,124 \text{Re} \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) + \ln(0,4587 \text{Re})$ $f = 1,613 \left\{ \ln \left[ 0,234 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{1,1007} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{60,525}{\text{Re}^{1,1105}} + \frac{56,291}{\text{Re}^{1,0712}} \right] \right\}^{-2}$	$4 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^8$ $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Fang et al. (11)	2011	$f = \left\{ -1,52 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon}{7,21D} \right)^{1,042} + \left( \frac{2,731}{\text{Re}} \right)^{0,9152} \right] \right\}^{-2,169}$	$3 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Ghanbari et al. (12)	2011	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left\{ \frac{\varepsilon}{3,71D} - \frac{1,975}{\text{Re}} \left[ \ln \left( \left( \frac{\varepsilon}{3,93D} \right)^{1,092} + \left( \frac{7,627}{\text{Re}+395,9} \right) \right) \right] \right\}$	$4 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$

A determinação do “*f*”, tanto para as equações explícitas como para equação de Colebrook-White, foi realizada utilizando-se planilha do Microsoft Excel com valores de Re no intervalo de  $4 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^8$ , abrangendo o regime de fluxo turbulento, e  $\varepsilon/D$  variando de  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$  obtendo 160 conjuntos de dados para cada aproximação analisada.

Para a análise estatística dos valores simulados, as equações explícitas foram comparadas com a implícita de Colebrook-White, a qual foi estipulada como padrão referencial.

A exatidão foi determinada pelo índice de concordância (Ic) proposto por Willmott (1981). Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a um, para a concordância perfeita. O índice de concordância (14) fornece o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas e pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$Ic = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Ei - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Ei - O| + |Oi - O|)^2} \right] \quad (14)$$

em que Ei são os valores estimados, Oi são os valores observados e O é a média dos valores observados.

O índice de precisão (Ip) (15), adaptado do Coeficiente de Correlação de Pearson, permite quantificar o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise (LIRA; NETO, 2006), e pode ser estimado por:

$$Ip = \frac{\sum_{i=1}^n (Ei - E)(Oi - O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Ei - E)^2 \sum_{i=1}^n (Oi - O)^2}} \quad (15)$$

em que Ei são os valores estimados, Oi os valores observados, E a média dos valores estimados e O a média dos valores observados.

A avaliação do desempenho das equações foi realizada através do índice de desempenho (Id) (16), adaptado de Camargo e Sentelhas (1997), cujo valor é o produto do índice de concordância (Ic) e do índice de precisão (Ip), expresso por:

$$Id = Ip \cdot Ic \quad (16)$$

O critério de interpretação do índice de desempenho e das respectivas classes de desempenho foi realizado de acordo com Pimenta (2017).

Além disso, utilizou-se a média do erro relativo (MER) (17), que, segundo Yildirim (2009) e Samadianfard (2012), é um parâmetro

DESEMPENHO E PRECISÃO DE EQUAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA EM REGIME DE FLUXO TURBULENTO

muito útil para avaliar praticamente o modelo mais preciso para a estimativa do coeficiente de perda de carga. A MER é expressa por:

$$MER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{|f_{CW} - f_{explícita}|}{f_{CW}} \right] 100 \quad (17)$$

em que MER é a média do erro relativo (%);  $f_{CW}$  é o coeficiente de perda de carga de Colebrook-White (adimensional);  $f_{explícita}$  é o

coeficiente de perda de carga da equação explícita analisada (adimensional).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos do índice de concordância, índice de precisão, classificação do índice de desempenho e os valores da média do erro relativo estão dispostos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Valores do índice de concordância (Ic), índice de precisão (Ip), classificação do índice de desempenho (Id) e da média do erro relativo (MER) do coeficiente de perda de carga das equações explícitas em relação à Colebrook-White.

Equações Explícitas	Ic	Ip	Id	MER (%)
Chen (3)	1,0000	1,0000	Excelente	0,35
Round (4)	1,0000	0,9986	Excelente	3,71
Haaland (5)	1,0000	0,9999	Excelente	0,70
Tsal (6)	0,9996	0,9791	Excelente	8,95
Romeo et al. (7)	1,0000	0,9997	Excelente	0,80
Sonnad e Goudar (8)	1,0000	0,9999	Excelente	0,52
Buzzelli (9)	1,0000	1,0000	Excelente	0,34
Vantankhah e Kouchakzadeh (10)	1,0000	1,0000	Excelente	0,36
Fang et al. (11)	1,0000	1,0000	Excelente	0,43
Ghanbari et al. (12)	0,9999	0,9888	Excelente	4,78
Offor e Alabi (13)	1,0000	1,0000	Excelente	0,30

Para o Ic, há elevado grau de exatidão entre as equações explícitas do “ $f$ ” e a implícita de Colebrook-White, com valores maiores que 0,9, bem como o Ip, que obteve elevado o grau de associação entre as equações envolvidas na análise.

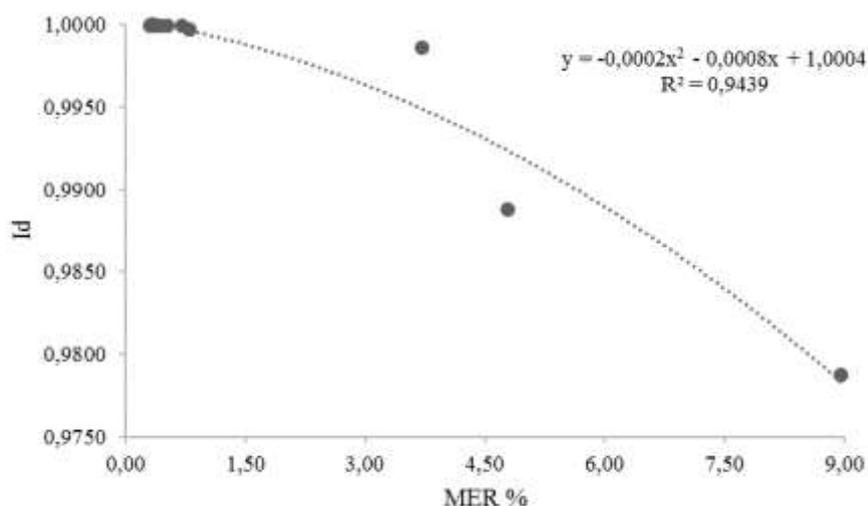
De acordo com Pimenta (2017), a classificação do índice de desempenho se enquadra como “Excelente” para todas equações explícitas analisadas, ou seja, com Id > 0,9.

Os autores Winning e Coole (2013), analisando a precisão de equações explícitas do “ $f$ ” em relação à Colebrook-White, encontraram valores da média do erro relativo semelhantes aos encontrados nesse estudo, destacando-se as equações (9) e (3) com baixos

valores de MER, e a equação (6) com valores elevados de MER.

Genic et al. (2011) encontraram resultados semelhantes na comparação de formulações explícitas do “ $f$ ” com a implícita de Colebrook-White, com valores de MER baixos para as equações (5), (11) e (7). A equação (4), para esse mesmo autor, corroborando os resultados obtidos nesse estudo, apresentou valores elevados de MER.

Na Figura 1 está demonstrada a relação entre o índice de desempenho e a média do erro relativo das equações explícitas do coeficiente de perda de carga quando comparadas com a implícita de Colebrook-White, válida para o intervalo de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .



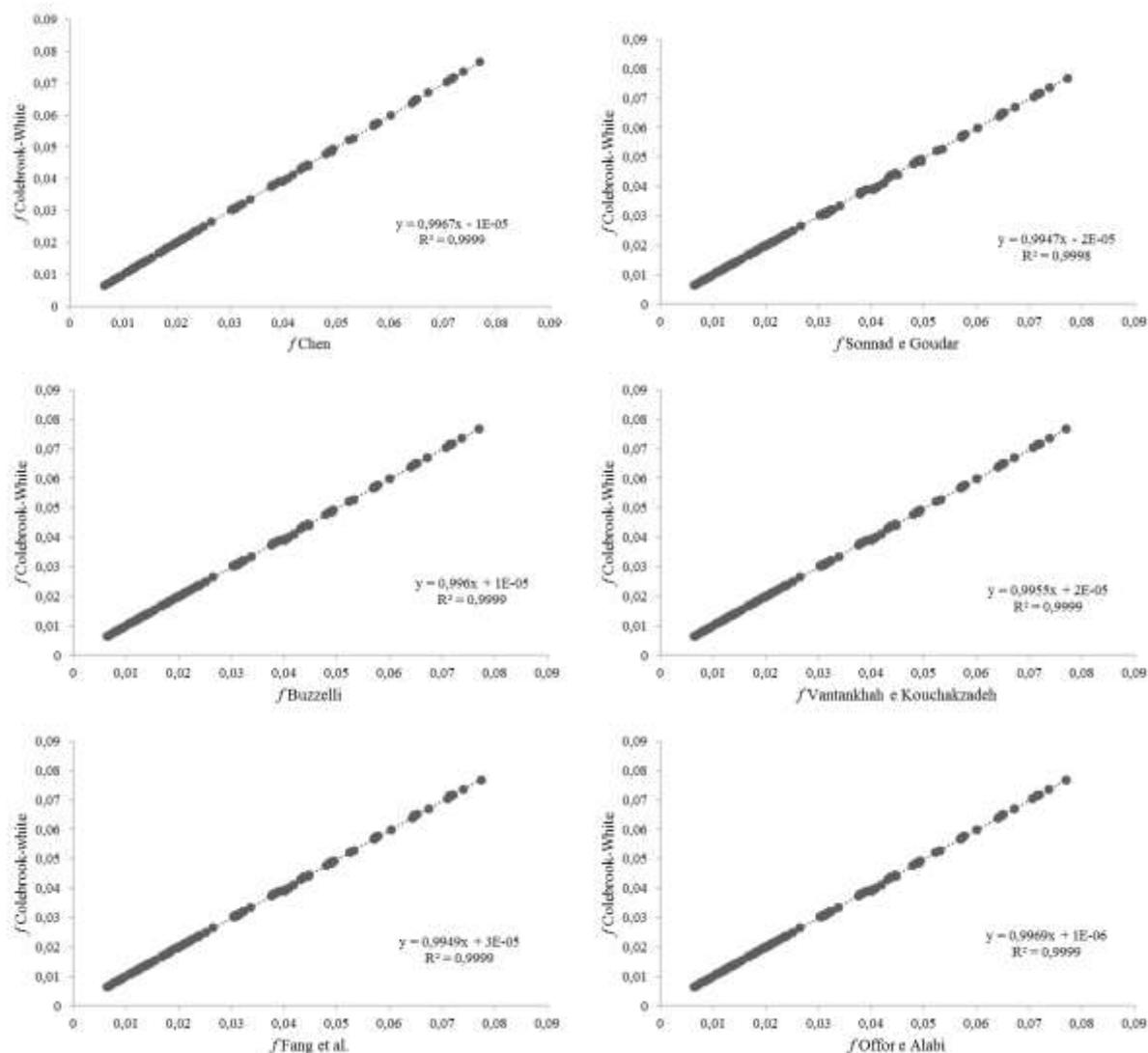
**Figura 1.** Comparação da média do erro relativo (MER) com o índice de desempenho (Id) das equações explícitas do coeficiente de perda de carga em relação à Colebrook-White.

Pode-se destacar, através da Figura 1, que as equações explícitas do “ $f$ ” que possuíram os maiores valores de índice de desempenho obtiveram, concomitantemente, as menores médias do erro relativo, sendo que, aproximadamente 83% das equações tem  $Id > 0,99$  e 75% das equações apresentaram valores da MER (%) menores que 1,00.

Para abranger somente as equações que obtiveram elevada precisão foram selecionadas as equações (3), (8), (9), (10), (11) e (13) por apresentarem MER menor que 0,55%.

Na Figura 2 está representado a reta de regressão dos valores do “ $f$ ” dessas seis equações explícitas em relação aos valores do “ $f$ ” de Colebrook-White.

DESEMPENHO E PRECISÃO DE EQUAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA EM REGIME DE FLUXO TURBULENTO



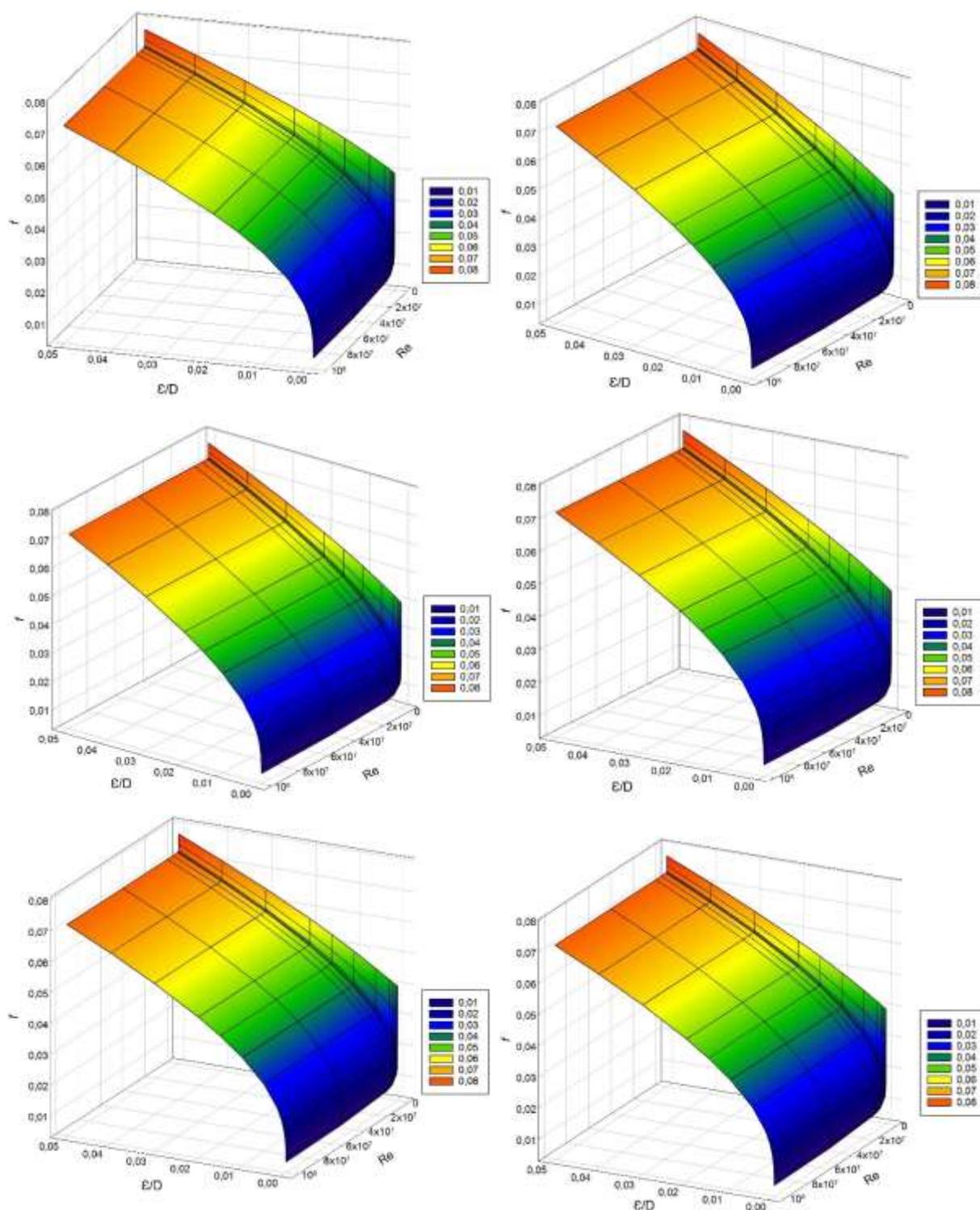
**Figura 2.** Valores do “ $f$ ” da equação de Chen (3), Sonnad e Goudar (8), Buzzelli (9), Vantankhah e Kouchakzadeh (10), Fang et al. (11) e Offor e Alabi (13) quando comparado com o “ $f$ ” da equação de Colebrook-White (2).

Uma análise visual da Figura 2 permite observar que a distribuição dos pontos em torno da reta de regressão dos valores do “ $f$ ” das equações explícitas comparado com os valores do “ $f$ ” de Colebrook-White apresentam um comportamento similar, isto é, forte aderência à reta de regressão.

Observa-se, ainda, para todas as equações apresentadas, que a análise de regressão forneceu um valor para o coeficiente angular próximo de 1,0, o

coeficiente linear próximo de zero e com elevado coeficiente de determinação ( $R^2$  próximo de 1,0), confirmando pequena dispersão dos pontos em relação à reta de regressão.

Na Figura 3 está exposto com maiores detalhes o comportamento do coeficiente de perda de carga dessas seis equações, quando analisadas no intervalo de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .



**Figura 3.** Comportamento do coeficiente de perda de carga ( $f$ ) da equação de Chen (3), Sonnad e Goudar (8), Buzzelli (9), Vantankhah e Kouchakzadeh (10), Fang et al. (11) e Offor e Alabi (13) para regime de fluxo turbulento.

Nota-se que, quanto mais elevado for os valores da rugosidade relativa maior são os valores do “ $f$ ”, e dessa forma, mais elevada será a perda de carga da tubulação. Além disso, a medida que os valores do número

de Reynolds se elevam, os valores do “ $f$ ” decrescem, tendendo à valores constantes, o mesmo que ocorre no gráfico de Moody (1947) e, também, corroboram as conclusões de Coban (2012).

## CONCLUSÃO

1. As equações explícitas do coeficiente de perda de carga apresentaram elevado índice de desempenho, classificando-as como “Excelente”, e elevada precisão quando comparadas com a aproximação de Colebrook-White.

2. Há relação entre o desempenho e a precisão das equações explícitas do coeficiente de perda de carga, ou seja, quanto maior o índice de desempenho menor será o valor da média do erro relativo.

## REFERÊNCIAS

- BRKIĆ, D. A note on explicit approximations to Colebrook’s friction factor in rough pipes under highly turbulent cases. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 93, p. 513-515, 2016.
- BRKIĆ, D.; ČOJBAŠIĆ, Ž. Intelligent flow friction estimation. **Computational Intelligence and Neuroscience**, 10 p, 2016.
- BRKIĆ, D.; ČOJBAŠIĆ, Ž. Evolutionary Optimization of Colebrook’s Turbulent Flow Friction Approximations. **Fluids**, v. 2, n. 2, p.15, 2017.
- BUZZELLI, D. Calculating friction in one step. **Machine Design**, v. 80, n. 12, p. 54-55, 2008.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p. 89-97, 1997.
- CHEN, N. H. An explicit equation for friction factor in pipes. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 18, n. 3, p. 296-297, 1979.
- ÇOBAN, M. T. Error analysis of non-iterative friction factor formulas relative to Colebrook-White equation for the calculation of pressure drop in pipes. **Journal of Naval Science and Engineering**, v. 8, n.1, p 1-13, 2012.
- COLEBROOK, C. F.; WHITE, C. M. Experiments with fluid friction in roughened pipes. **Proceedings of the Royal Society of London**. Series A, Mathematical and Physical Sciences, v. 161, n. 906, p. 367-381, 1937.
- DARCY, H. **Recherches expérimentales relatives au mouvement de l’eau dans les tuyaux**, Mallet-Bachelier, Paris. 268p, v.1, 1857.
- FANG, X.; XU, Y.; ZHOU, Z. New correlations of single-phase friction factor for turbulent pipe flow and evaluation of existing single-phase friction factor correlations. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, n. 3, p. 897-902, 2011.
- GHANBARI, A.; FARSHAD, F.; RIEKE, H. Newly developed friction factor correlation for pipe flow and flow assurance. **Journal of Chemical Engineering and Materials Science**, v. 2, n. 6, p. 83-86, 2011.
- GENIĆ, S.; ARANDJELOVIĆ, I.; KOLENDIĆ, P.; JARIĆ, M.; BUDIMIR, N.; GENIĆ, V. A review of explicit approximations of Colebrook’s equation. **FME Transactions**. v. 39, n. 2, p. 67-71, 2011.
- HAALAND, S. E. Simple and explicit formulas for friction factor in turbulent pipe flow. **Journal of Fluids Engineering**, v. 105, n. 1, p. 89-90, 1983.
- HEYDARI, A.; NARIMANI, E.; PAKNIYA, F. Explicit determinations of the Colebrook equation for the flow friction factor by statistical analysis. **Chemical Engineering Technology**, v. 38, n. 8, p. 1387-1396, 2015.
- LIRA, S. A.; NETO, A. C. Coeficientes de correlação para variáveis ordinais e dicotômicas derivados do coeficiente linear de

- Pearson. **Revista Ciência & Engenharia**, v. 15, n. 1/2, p. 45-53, 2006.
- MOODY, L. F. An approximate formula for pipe friction factors. **Trans. ASME**, v. 69, n. 12, p. 1005-1011, 1947.
- OFFOR, U. H.; ALABI, S. B. An accurate and computationally efficient friction factor model. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 6, n. 3, p. 237-245, 2016a.
- OFFOR, U. H.; ALABI, S. B. Performance evaluation of the explicit approximations of the implicit Colebrook equation. **Internacional Journal of Research in Engineering and Technology**, v.5, n. 8, p. 1-12, 2016b.
- PIMENTA, B. D. **Análise de formulações explícitas do coeficiente de perda de carga em condutos pressurizados**. 2017. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 130, n. 4, p. 318-324, 2004.
- ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZON, A. Improved explicit equation for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**, v. 86, n. 3, p. 369-374, 2002.
- ROUND, G. F. An explicit approximation for the friction factor-reynolds number relation for rough and smooth pipes. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 58, n. 1, p. 122-123, 1980.
- SAMADIANFARD, S. Gene expression programming analysis of implicit Colebrook-White equation in turbulent flow friction factor calculation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 92, p. 48-55, 2012.
- SHAIKH, M. M.; MASSAN S. R.; WAGAN, A. I. A new explicit approximation to Colebrook's friction factor in rough pipes under highly turbulent cases. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 88, p. 538-543, 2015.
- SCHRODER, F. C. **Levantamento em campo da rugosidade equivalente de tubos metálicos**. 2011. 204p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SONNAD, J. R.; GOUDAR, C. T. Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-White equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 8, p. 863-867, 2006.
- TSAL, R. J. Altshul-Tsal friction factor equation. **Heating, Piping and Air Conditioning**, v. 8, p. 30-45, 1989.
- VATANKHAH, A. R.; KOUCHAKZADEH, S. Discussion of "Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-White equation" by Jagadeesh R. Sonnad and Chetan T. Goudar. **Journal Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 8, 2008.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models, **Physical Geography**, v.2, n.2, 184-194, 1981.
- WINNING, H. K.; COOLE, T. Explicit friction factor accuracy and computational efficiency for turbulent flow in pipes. **Flow, Turbulence and Combustion**, v. 90, n. 1, p. 1-27, 2013.
- YILDIRIM, G. Computer-based analysis of explicit approximations to the implicit Colebrook-White equation in turbulent flow friction factor calculation. **Advances in Engineering Software**, v. 40, n. 11, p. 1183-1190, 2009.

DESEMPENHO E PRECISÃO DE EQUAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA  
EM REGIME DE FLUXO TURBULENTO

YOO, D. H.; SINGH, V. P. Two new methods  
for the computation of commercial pipe

friction factor. **Journal of Hydraulic  
Engineering**, v. 131, n. 8, p. 694-704, 2005.