

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**Bruna Dalcin Pimenta**

**ANÁLISE DE FORMULAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE  
PERDA DE CARGA EM CONDUTOS PRESSURIZADOS**

**Santa Maria, RS  
2017**

**Bruna Dalcin Pimenta**

**ANÁLISE DE FORMULAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA EM CONDUTOS PRESSURIZADOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

**Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina**

**Santa Maria, RS  
2017**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pimenta, Bruna Dalcin  
Análise de formulações explícitas do coeficiente de perda de carga em condutos pressurizados / Bruna Dalcin Pimenta.- 2017.  
66 f.; 30 cm

Orientador: Adroaldo Dias Robaina Adroaldo Dias Robaina  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2017

1. Perda de carga contínua 2. Darcy-Weisbach 3. Colebrook-White 4. Regime de fluxo turbulento I.  
Adroaldo Dias Robaina, Adroaldo Dias Robaina II. Título.

---

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Bruna Dalcin Pimenta. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

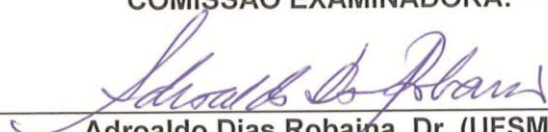
E-mail: brunadpimenta@gmail.com

---

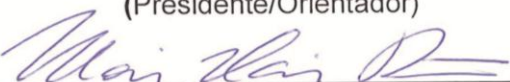
**Bruna Dalcin Pimenta**

**Análise de formulações explícitas do coeficiente de perda de carga em  
condutos pressurizados**

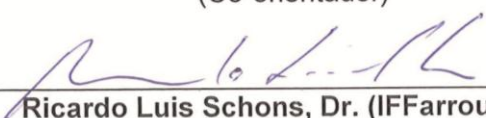
**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_

**Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

  
\_\_\_\_\_

**Marcia Xavier Peiter, Dr<sup>a</sup>. (UFSM)**  
(Co-orientador)

  
\_\_\_\_\_

**Ricardo Luis Schons, Dr. (IFFarroupilha)**

  
\_\_\_\_\_

**Tonismar dos Santos Pereira, Dr. (Unipampa)**

Santa Maria, 7 de Julho de 2017.

*“Você não pode provar uma definição. O que  
você pode fazer é mostrar que ela faz sentido”.*

Albert Einstein

## RESUMO

### ANÁLISE DE FORMULAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA EM CONDUTOS PRESSURIZADOS

AUTOR: Bruna Dalcin Pimenta  
ORIENTADOR: Adroaldo Dias Robaina

Um dos parâmetros envolvido no dimensionamento de sistemas hidráulicos pressurizados é a perda de carga das tubulações. Essa verificação pode ser realizada através da formulação de Darcy-Weisbach, que considera um coeficiente de perda de carga ( $f$ ) que pode ser mensurado pela equação implícita de Colebrook-White. Porém, para essa determinação é necessário utilizar métodos numéricos. Numerosas aproximações explícitas têm sido propostas para estimar o " $f$ ", com diferentes precisões e complexidade. Diante do exposto, o objetivo desse trabalho é analisar as aproximações explícitas do coeficiente de perda de carga para condutos pressurizados em relação a formulação de Colebrook-White, através do índice de desempenho e erro relativo, determinando as mais precisas para que possam substituir a padrão implícita, para o regime de fluxo turbulento. Foi analisado 29 equações explícitas presentes na literatura, determinando o coeficiente de perda de carga através de valores do número de Reynolds na faixa de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e rugosidade relativa de  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ , obtendo 160 pontos para cada equação, totalizando 4800 pontos. A análise estatística foi realizada pelo índice de desempenho ( $I_d$ ) e pelo erro relativo (ER) das equações explícitas em relação à Colebrook-White. As equações de Chen (1979), Shacham (1980), Sonnad Goudar (2006), Buzzelli (2008), Vantankhah e Kouchakzadeh (2008), Fang et al. (2011) e Ofor e Alabi (2016a) se aplicam para todo intervalo de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ , e apresentaram elevado  $I_d$  e elevada precisão, destacando-se a última por extrema precisão, sendo esta a indicada para substituir o uso da aproximação padrão de Colebrook-White.

**Palavras-chave:** Perda de carga contínua. Darcy-Weisbach. Colebrook-White. Regime de fluxo turbulento.

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF EXPLICIT FORMULATIONS OF THE PRESSURE LOSS COEFFICIENT IN PRESSURIZED CONDUITS

AUTHOR: BRUNA DALCIN PIMENTA  
ADVISOR: ADROALDO DIAS ROBAINA

One of the parameters involved in the design of pressurized hydraulic systems is the pressure drop of the pipes. This verification can be performed through the Darcy-Weisbach formulation, which considers a coefficient of loss of charge ( $f$ ) that can be measured by the implicit Colebrook-White equation. However, for this determination it is necessary to use numerical methods. Numerous explicit approaches have been proposed to estimate the " $f$ ", with different precisions and complexity. Considering the above, the objective of this work is to analyze the explicit approximations of the pressure loss coefficient for pressurized conduits in relation to the Colebrook-White formulation, through the relative performance and error index, determining the most accurate ones so that they can replace the standard Implied for the turbulent flow regime. It was analyzed 29 explicit equations in the literature, determining the coefficient of loss of charge through Reynolds number values in the range of  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  and relative roughness of  $10^{-6} \leq \varepsilon / D \leq 5 \times 10^{-2}$ , obtaining 160 points for each equation, totaling 4800 points. Statistical analysis was performed by the performance index ( $I_d$ ) and the relative error (ER) of the explicit equations in relation to Colebrook-White. The equations of Chen (1979), Shacham (1980), Sonnad Goudar (2006), Buzzelli (2008), Vantankhah and Kouchakzadeh (2008), Fang et al. (2011) and Offor and Alabi (2016a) apply for the entire range of  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  and  $10^{-6} \leq \varepsilon / D \leq 5 \times 10^{-2}$ , and presented high " $I_d$ " and high precision, the latter being highlighted by extreme precision, which is indicated to replace the use of the Colebrook-White standard approximation.

**Keywords:** Continuous load loss. Darcy-Weisbach. Colebrook-White. Turbulent flow regime.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aproximações explícitas para determinação do coeficiente de perda de carga ( $f$ ), com seus respectivos autores, ano de publicação e intervalo de aplicação.....	19
Tabela 2 - Aproximações explícitas para determinação do coeficiente de perda de carga ( $f$ ), com seus respectivos autores, ano de publicação e intervalo de aplicação.....	20
Tabela 3 - Aproximações explícitas para determinação do coeficiente de perda de carga ( $f$ ), com seus respectivos autores, ano de publicação e intervalo de aplicação.....	21
Tabela 4 - Aproximações explícitas para determinação do coeficiente de perda de carga ( $f$ ), com seus respectivos autores, ano de publicação e intervalo de aplicação.....	22
Tabela 5 - Valores do índice de concordância ( $I_c$ ) e sua respectiva classificação. .	23
Tabela 6 - Valores do índice de precisão ( $I_p$ ) e a respectiva classificação da correlação.....	24
Tabela 7 - Valores do índice de desempenho ( $I_d$ ) e as respectivas classes de desempenho.....	25
Tabela 8 - Valores da média do erro relativo (MER) e sua respectiva classificação.....	25
Tabela 9 - Valores do índice de concordância ( $I_c$ ), índice de precisão ( $I_p$ ) e índice de desempenho ( $I_d$ ), com suas respectivas classificações, do coeficiente de perda de carga das equações explícitas em relação à Colebrook-White.....	27
Tabela 10 - Valores do índice de concordância ( $I_c$ ), índice de precisão ( $I_p$ ) e índice de desempenho ( $I_d$ ), com suas respectivas classificações, do coeficiente de perda de carga das equações explícitas em relação à Colebrook-White.....	28
Tabela 11 - Valores da média do erro relativo (MER) das equações explícitas em relação à Colebrook-White e a respectiva classificação do mesmo.....	29



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação da média do erro relativo (MER) com o índice de desempenho ( $I_d$ ) das equações explícitas do coeficiente de perda de carga em relação à Colebrook-White. ....	31
Figura 2 - Equações explícitas do coeficiente de perda de carga que se enquadram na faixa de aplicabilidade de $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ e $10^{-6} \leq \epsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ , e a respectiva média do erro relativo (MER) das que apresentam valores abaixo de 0,55%. ....	32
Figura 3 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Chen (10) quando comparados a equação de Colebrook-White (3). ....	34
Figura 4 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Shacham (12) quando comparados a equação de Colebrook-White (3). ....	35
Figura 5 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Sonnad e Goudar (21) quando comparados a equação de Colebrook-White (3). ...	36
Figura 6 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Buzzelli (23) quando comparados a equação de Colebrook-White (3). ....	36
Figura 7 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Vantankhah e Kouchakzadeh (24) quando comparados a equação de Colebrook-White (3). ....	37
Figura 8 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Fang et al. (28) quando comparados a equação de Colebrook-White (3). ....	38
Figura 9 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Offor e Alabi (32) quando comparados a equação de Colebrook-White (3). ....	39
Figura 10 - Valores do coeficiente de perda de carga ( $f$ ) da equação de Offor e Alabi (32) quando comparado com o " $f$ " da equação de Colebrook-White (3). ....	40
Figura 11 - Comportamento do coeficiente de perda de carga ( $f$ ) da equação de Offor e Alabi (32) para regime de fluxo turbulento. ....	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
2.1	SISTEMAS HIDRÁULICOS PRESSURIZADOS.....	11
2.2	REGIMES DE ESCOAMENTO.....	12
2.3	RUGOSIDADE DAS TUBULAÇÕES .....	13
2.4	PERDA DE CARGA CONTÍNUA .....	13
2.5	EQUAÇÃO DE DARCY-WEISBACH .....	14
2.6	EQUAÇÃO DE COLEBROOK-WHITE.....	15
2.7	EQUAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA.....	18
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>51</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A estimativa da perda de carga em condutos pressurizados pode ser um dos problemas mais significativos em estudos de otimização, análise hidráulica de dutos e sistemas de distribuição de água (BARDESTANI et al., 2017), assim como em projetos de engenharia de irrigação, afetando o balanço hidráulico e os custos do sistema.

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 ( $f$ ).

De acordo com Coban (2012), a melhor aproximação do coeficiente de perda de carga de Darcy-Weisbach para o regime em fluxo turbulento é dada pela equação de Colebrook-White (1937), a qual relaciona o número de Reynolds ( $Re$ ) e a rugosidade relativa da tubulação ( $\varepsilon/D$ ). Trata-se de uma fórmula implícita, cuja solução é obtida através de processos iterativos (BRKIĆ; ČOJBAŠIĆ, 2017).

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, como a de Moody (1947), Wood (1966), Churchill (1973), Eck (1973), Jain (1976), Swamee e Jain (1976), Chen (1979), Round (1980), Shacham (1980), Barr (1981), Zigrang e Sylvester (1982), Haaland (1983), Tsal (1989), Robaina (1992), Manadilli (1997), Sousa et al. (1999), Romeo et al. (2002), Sonnad e Goudar (2006), Rao e Kumar (2007), Buzzelli (2008), Vantankhah e Kouchakzadeh (2008), Avci e Karagoz (2009), Papavangelou et al. (2010), Brkić (2011), Fang (2011), Ghanbari et al. (2011), Shaikh et al. (2015), Brkić (2016) e Offor e Alabi (2016).

Com isso, o objetivo dessa pesquisa foi analisar as aproximações explícitas do coeficiente de perda de carga para condutos pressurizados em relação a formulação de Colebrook-White, através do índice de desempenho e do erro relativo, que contemplem o intervalo de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ , determinando as mais precisas para que possam substituir a padrão implícita.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo a revisão dos principais temas que embasaram este trabalho. Desta forma, serão descritos os aspectos gerais sobre sistemas hidráulicos pressurizados, regimes de escoamento, rugosidade das tubulações, perda de carga contínua, equação de Darcy-Weisbach, equação de Colebrook-White e equações explícitas do coeficiente de perda de carga.

### 2.1 SISTEMAS HIDRÁULICOS PRESSURIZADOS

Em sistemas hidráulicos pressurizados, o fluido é submetido a variações de pressão, decorrentes da variação da velocidade de escoamento ou ainda do atrito do fluido com a face interna da parede do conduto. Essa variação na velocidade provoca uma perda de energia hidráulica, denominada de perda de carga, que pode ser dividida em perda localizada (devido ao uso de peças especiais, como ampliações, reduções, curvas, válvulas, entre outras) e perda contínua.

Segundo Resende (2007), a maioria dos dutos utilizados nas aplicações de engenharia possui seção circular e operam em regime turbulento, e a maior parcela da perda de carga é associada à perda de carga contínua.

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. Propriedades e dimensões físicas dos componentes do sistema apresentam variabilidade natural inerente ao próprio processo de fabricação, influenciando na uniformidade de distribuição (ZITTERELL et al., 2009), assim como as características hidráulicas de operação, como pressão de escoamento e perda de carga em tubulações (PROVENZANO; PUMO, 2004).

No caso da agricultura irrigada, por ser o maior usuário de água no mundo, e como a matriz energética brasileira está baseada na produção de energia hidroelétrica, há necessidade de constantes aprimoramentos técnicos e científicos para maximizar o uso da água e racionalizar o consumo energético, aumentando,

assim, as áreas de produção agrícola com os recursos naturais disponíveis (RETTORE NETO, 2011).

## 2.2 REGIMES DE ESCOAMENTO

Foi identificado, por Osborne Reynolds (1883), que o regime de escoamento depende especialmente da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido. Essa dependência foi descrita através de uma relação chamada de número de Reynolds (Re) e é expressa para o escoamento interno em um tubo circular pela seguinte equação:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$

Em que Re é o número de Reynolds (adimensional);  $\nu$  é viscosidade cinemática do fluido ( $m^2.s^{-1}$ ); D é o diâmetro da tubulação (m) e V é a velocidade de escoamento do fluido ( $m.s^{-1}$ ).

De acordo com Çengel e Cimbala (2007), o escoamento do fluido é aerodinâmico a baixas velocidades e é caótico a medida que a velocidade aumenta para um valor acima de um valor crítico. O regime de escoamento é considerado laminar quando as linhas de corrente são suaves e com movimento ordenado. No segundo caso, o regime de escoamento é dito turbulento quando há oscilações de velocidade e movimento excessivamente desordenado. O escoamento de transição ocorre em alguma região na qual o escoamento alterna entre o laminar e o turbulento.

White (2009) cita que, em condutos forçados, o regime de escoamento é laminar para números de Reynolds menores do que 2000 ( $Re < 2000$ ) e turbulento para número de Reynolds maiores do que 4000 ( $Re > 4000$ ). Para números de Reynolds entre 2000 e 4000 o regime de escoamento pode ser considerado transitório.

De acordo com McLaughlin et al. (1981) e Resende (2007), na maioria das aplicações práticas envolvendo escoamento forçado de água em tubulações, o regime de escoamento será turbulento.

Segundo Carvalho e Oliveira (2008), para cada regime de escoamento existe uma equação para o cálculo do coeficiente de perda de carga baseado na análise preliminar que envolve o coeficiente de rugosidade do tubo ( $\epsilon$ ).

### 2.3 RUGOSIDADE DAS TUBULAÇÕES

Segundo Brkić (2011) e MacDonald et al. (2016), geralmente não há superfície interna de tubos perfeitamente lisa, todas as paredes do tubo têm, fisicamente, superfícies ásperas. O grau de rugosidade varia de acordo com o processo de fabricação, acabamento de superfície, tipo de material de tubo (HAMMAD, 1999), idade, condições de exploração, entre outros.

As superfícies ásperas são encontradas em muitas formas nos sistemas de engenharia (BONS, 2010) e no ambiente (FINNIGAN, 2000; BRITTER; HANNA, 2003). Sabe-se que a presença de rugosidade afeta muitas propriedades do fluxo turbulento próximo da parede dos tubos (JIMÉNEZ, 2004).

Segundo Busse et al. (2015), a rugosidade pode ser um efeito colateral da produção de uma superfície, onde um nível mais alto de acabamento seria antieconômico, ou pode se desenvolver ao longo do tempo devido à erosão ou à acumulação de depósitos.

Para aplicações envolvendo escoamento em tubulações de sistemas de irrigação não há um procedimento definido que permita identificar exatamente o valor da rugosidade absoluto, sendo normalmente adotado tabelas em função do tipo de material utilizado (BERNARDO et al., 2006; AZEVEDO NETTO et al., 2015).

Os valores tabelados de rugosidade em tubos, embasados nas experiências de Johann Nikuradse (NIKURADSE, 1933), foram obtidos há muito tempo e podem não refletir com precisão a rugosidade de tubos comerciais atuais, haja vista as alterações dos materiais e nos processos de fabricação dos tubos.

### 2.4 PERDA DE CARGA CONTÍNUA

Segundo Porto (2006), a perda contínua de carga é decorrente da resistência ao escoamento oferecida pela viscosidade do fluido e pela inércia das partículas, sendo variável com a rugosidade da parede do tubo, diâmetro da tubulação e com a velocidade de escoamento.

Telles (1994) afirma que o escoamento de um fluido em uma tubulação sempre tem como consequência certa perda de energia do fluido, que é gasta para vencer as resistências que se opõem ao escoamento, e que é dissipada na forma de calor.

Munson et al. (2004), afirmam que a maioria dos condutos utilizados para transportar fluidos apresenta seção transversal circular e são projetados para suportar uma diferença de pressão.

São apresentados métodos numéricos e também resultados de extensos trabalhos experimentais para determinar o coeficiente de perda de carga. Nos cálculos hidráulicos usuais, as equações de Darcy-Weisbach ou de Hazen-Williams (1902) são preferidas para o cálculo da perda de carga (BARDESTANI et al., 2017).

A equação de Hazen-Williams não é dimensionalmente homogênea e seu intervalo de aplicabilidade é limitado (VALIANTZAS, 2005; URIBE et al., 2015), considerando um coeficiente “C” fixo para qualquer diâmetro de tubo. De acordo com Liou (1998), a equação de Hazen-Williams pode produzir erros que excedem 40% quando comparada com a equação de Darcy-Weisbach. A terceira edição do *Hydraulic tables de Williams e Hazen* (1933), limitou-se a aplicação da equação com diâmetro  $0,05 < D < 1,85\text{m}$  e número de Reynolds  $8 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^6$ . Além disso, Christiansen et al. (2000) relataram que essa equação é válida apenas entre fluxo turbulento liso e de transição.

## 2.5 EQUAÇÃO DE DARCY-WEISBACH

A equação de Darcy-Weisbach (2) é uma das mais utilizadas para determinação de perda de carga (VON BERNUTH, 1990; BAGARELLO et al., 1995), pois relaciona características do fluido e do material do conduto, sendo de elevada importância para projetar sistemas que movem líquidos ou gases, podendo ser, ainda, utilizada para qualquer tipo de material e qualquer diâmetro de tubulação, sendo apresentada da seguinte maneira:

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

Em que  $h_f$  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 ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m.s}^{-2}$ ).

Cardoso et al. (2008) afirmam que a equação de Darcy-Weisbach é a mais precisa em relação as demais, pois ela não assume um coeficiente de rugosidade constante para todos os tipos de diâmetros e velocidades de escoamento.

Darcy-weisbach relacionou em sua “fórmula universal da perda de carga”, como citado por Avezedo Netto (2015), um coeficiente de perda de carga ( $f$ ) ou também conhecido como fator de atrito. Segundo Shaikh et al. (2015), a determinação do coeficiente de perda de carga em tubos com fluxo turbulento é de grande importância em muitas aplicações de engenharia. Além disso, Oke et al. (2015) relatam que são raros na literatura de países em desenvolvimento, como o Brasil, atualizações sobre o coeficiente de perda de carga de Darcy-Weisbach.

Frizzone et al. (1998) descrevem que o coeficiente de perda de carga desta equação varia com o número de Reynolds e a rugosidade relativa do tubo, o que influencia, por sua vez, na seleção dos diâmetros e estimativa da energia requerida (RETTORRE NETO, 2011).

Haktanir e Ardiçlioğlu (2004), afirmam que a equação de Darcy-Weisbach para a perda de carga em tubos produz melhor precisão do que outras equações, tais como Hazen-Williams, devido ao fato que o coeficiente de perda de carga envolvido é determinado tanto em função da parede do tubo (rugosidade  $\mathcal{E}$ ) como do número de Reynolds ( $Re$ ).

A equação implícita de Colebrook-White é uma das mais utilizadas para determinar o “ $f$ ”. Além desta, existem várias equações explícitas para determinar o coeficiente de perda de carga de Darcy-Weisbach para um tubo, dependendo do tipo da tubulação e o regime de escoamento (MIKATA; WALCZAK, 2015).

## 2.6 EQUAÇÃO DE COLEBROOK-WHITE

Nikuradse (1933) desenvolveu experiências com o objetivo de estudar os regimes de escoamento em condutos. Estas experiências foram orientadas por Prandtl (1930) e Von Kármán (1930) e consistiram na determinação de perdas de



carga contínuas provocadas por escoamentos no interior de condutos circulares com rugosidade artificial.

Durante as experiências realizadas, utilizaram-se condutos materializados por tubos de vidro e a rugosidade artificial era conseguida colando-se grãos de areia nas paredes desses tubos. Por sua vez, os grãos de areia eram selecionados de forma a obter rugosidades uniformes.

Ao dispor os resultados obtidos nas suas experiências num diagrama em que figurava o logaritmo do coeficiente de perda de carga em função do logaritmo do número de Reynolds, Nikuradse observou que existiam três regimes bem distintos.

O primeiro é o regime Laminar, no qual o coeficiente de perda de carga ( $f$ ) depende apenas do número de Reynolds ( $Re$ ), existindo uma relação linear entre ambas as grandezas expressa pela equação de Hagen-Poiseuille (1856) em que  $f = \frac{64}{Re}$ . Para o regime Turbulento Liso, Nikuradse afirma que a " $f$ " depende somente de  $Re$ , e pode ser definido pela fórmula de Prandtl-von Kármán em que  $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right)$ . Já no regime Turbulento Rugoso o " $f$ " independe de  $Re$ , dependendo somente da rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ), podendo ser expresso por von-Kármán (1930), em que  $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\epsilon}{3,7D}\right)$ .

Mais tarde, em 1937, Colebrook e White desenvolveram experiências em condutos comerciais, com o objetivo de estudar a transição entre o regime turbulento liso e o regime turbulento rugoso. Como resultado do estudo empreendido, chegaram à conclusão de que adicionando o argumento da função logaritmo da fórmula de Prandtl-von Kármán (regime turbulento liso) ao argumento da função logaritmo da fórmula de von Kármán (regime turbulento rugoso) obtinha-se uma expressão que, em todo o domínio dos escoamentos turbulentos, traduzia com bastante rigor (erros de 3 a 5%) os valores obtidos nas experiências realizadas, surgindo assim aquela que é hoje vulgarmente conhecida por equação de Colebrook-White (3), e é expressa a seguir:

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

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

De acordo com Coban (2012), a rugosidade relativa é a proporção da altura média da rugosidade do tubo para o diâmetro do mesmo, e, além disso, é um indicador de imperfeições do material o qual o tubo é feito (ANAYA-DURAND et al., 2014).

Segundo Brkić (2011b), a equação de Colebrook-White é amplamente usada na indústria do petróleo para cálculos de oleodutos e gasodutos, em engenharia civil para cálculo dos sistemas de distribuição de água, para sistemas de drenagem, sistemas de ventilação, em engenharia química, e em todos os domínios da engenharia, onde houver fluxo de fluido.

A equação de Colebrook-White tem sido considerada a mais precisa aproximação para determinação do coeficiente de perda de carga, sendo utilizada como padrão referencial (YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006; COBAN, 2012; 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  $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$ . Mas, apesar disto, é implícita em relação ao coeficiente de perda de carga, ou seja, sua resolução requer um processo iterativo (YILDIRIM, 2009; OFFOR; ALABI, 2016b; BRKIĆ, 2016; BRKIĆ; ČOJBAŠIĆ, 2017).

Com base nas fórmulas de Hagen-Poiseuille e de Colebrook-White, Moody (1944) desenvolveu um gráfico que permitia determinar " $f$ " em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa, chamado de gráfico de Moody (ANEXO A) que abrange valores de  $10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .

Deixa-se claro que o gráfico de Moody foi construído usando a equação de Colebrook-White e não oposto (COLEBROOK, 1939; MOODY, 1944). Sendo assim, a equação de Colebrook-White pode ser utilizada em substituição ao gráfico de Moody (HAKTANIR; ARDIÇLIOĞLU, 2004).

Embora o uso de métodos gráficos seja fácil, é difícil estimar o " $f$ " exato no gráfico de Moody, uma indicação de que este método não é adequado para a concepção de sistemas de distribuição de água (BARDESTANI et al., 2017).

## 2.7 EQUAÇÕES EXPLÍCITAS DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA

As aproximações explícitas dão uma predição relativamente boa do coeficiente de perda de carga e podem reproduzir com precisão a equação de Colebrook-White e o gráfico de Moody (BRKIĆ; ČOJBAŠIĆ, 2017).

Além disso, segundo os mesmos autores, a equação implícita de Colebrook-White não pode ser rearranjada para derivar o coeficiente de perda de carga diretamente em uma etapa, pois o cálculo iterativo pode causar problemas na simulação de fluxo em um sistema de tubulação em que pode ser necessário avaliar o coeficiente centenas ou milhares de vezes. Esta é a principal razão para tentar desenvolver uma relação que é uma aproximação razoável e possível para a equação de Colebrook-White, mas que é explícita no coeficiente de perda de carga.

Diversos pesquisadores se empenharam em encontrar equações explícitas, que pudessem ser utilizadas como alternativas à equação de Colebrook-White (GENIĆ et al., 2011; WINNING; COOLE, 2013; ASKER et al., 2014; ASSEFA; KAUSHAL, 2015; MIKATA; WALCZAK, 2015; TALER, 2016), e, segundo Bardestani et al. (2017), relações mais complexas estimam o coeficiente de perda de carga com maior exatidão.

De acordo com Coban (2012) existem várias equações aproximadas para determinar o coeficiente de perda de carga de Darcy-Weisbach com algum erro relativo em comparação a equação de Colebrook-White. Segundo o mesmo autor, em algumas equações explícitas, o erro de percentagem é tão pequeno que pode ser utilizado diretamente em vez da equação implícita de Colebrook-White.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para esse estudo foram analisadas 29 equações explícitas do coeficiente de perda de carga de diferentes autores, anos de publicação e escala de aplicabilidade do número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\varepsilon/D$ ), demonstradas na Tabela 1. A escolha das mesmas foi determinada a fim de contemplar a maioria das equações disponíveis na literatura e as quais são frequentemente utilizadas por diversos autores. Neste estudo, qualquer modelo desprovido de iterações é considerado como sendo explícito.

Tabela 1 - Aproximações explícitas para determinação do coeficiente de perda de carga ( $f$ ), com seus respectivos autores, ano de publicação e intervalo de aplicação.

Referência/Nº equação	Ano	Equação explícita do coeficiente “f”	Intervalo aplicável
Moody (4)	1947	$f = 0,0055 \left[ 1 + \left( 2 \times 10^4 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right]$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$
Wood (5)	1966	$f = 0,094 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{0,225} + 0,53 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) + 88 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{0,44} Re^{-1,62 \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{0,134}}$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^7$ $10^{-5} \leq \varepsilon/D \leq 4 \times 10^{-2}$
Churchill (6)	1973	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,71D} + \left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right]$	Não especificado
Eck (7)	1973	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,71D} + \frac{15}{Re} \right)$	$0 \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$
Jain (8)	1976	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,715D} + \left( \frac{6,943}{Re} \right)^{0,9} \right]$	$5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^7$
Swamee e Jain (9)	1976	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right)$	$5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Chen (10)	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 (11)	1980	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,8 \log \left[ \frac{Re}{0,135 Re \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) + 6,5} \right]$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$

Tabela 2 - Aproximações explícitas para determinação do coeficiente de perda de carga ( $f$ ), com seus respectivos autores, ano de publicação e intervalo de aplicação.

Referência/Nº equação	Ano	Equação explícita do coeficiente “f”	Intervalo aplicável
Shacham (12)	1980	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7D} - \frac{5,02}{Re} \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{14,5}{Re} \right) \right]$ $\frac{1}{\sqrt{f}} =$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^8$
Barr (13)	1981	$-2 \log \left\{ \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{4,518 \log \left( \frac{Re}{7} \right)}{Re \left[ 1 + \frac{Re^{0,52} \left( \frac{\varepsilon}{D} \right)^{0,7}}{29} \right]} \right\}$	Não especificado
Zigrang e Sylvester (14)	1982	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left\{ \frac{\varepsilon}{3,7D} - \frac{5,02}{Re} \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7D} - \frac{5,02}{Re} \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{13}{Re} \right) \right] \right\}$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $4 \times 10^{-5} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Haaland (15)	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 (16)	1989	$A = 0,11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{\varepsilon}{D} \right)^{0,25}$ <p>Se <math>A \geq 0,018</math> então <math>f = A</math> Se <math>A &lt; 0,018</math> então <math>f = 0,0028 + 0,85A</math></p>	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Robaina (17)	1992	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( 0,27 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{5,62}{Re^{0,9}} \right)$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^7$ $10^{-5} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$
Manadilli (18)	1997	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{D} + \frac{95}{Re^{0,983}} + \frac{96,82}{Re} \right)$	$5.235 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Sousa et al. (19)	1999	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7D} - \frac{5,16}{Re} \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,09}{Re^{0,87}} \right) \right]$ $\frac{1}{\sqrt{f}} =$	Não especificado
Romeo et al. (20)	2002	$-2 \log \left\{ \frac{\varepsilon}{3,7065D} - \frac{5,0272}{Re} \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,827D} - \frac{4,567}{Re} \log \left( \left( \frac{\varepsilon}{7,7918D} \right)^{0,9924} + \left( \frac{5,3326}{208,815 + Re} \right)^{0,9345} \right) \right] \right\}$	$3 \times 10^3 \leq Re \leq 1,5 \times 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$

Tabela 3 - Aproximações explícitas para determinação do coeficiente de perda de carga ( $f$ ), com seus respectivos autores, ano de publicação e intervalo de aplicação.

Referência/Nº equação	Ano	Equação explícita do coeficiente “f”	Intervalo aplicável
Sonnad e Goudar (21)	2006	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,8686 \ln \left( \frac{0,4587 Re}{\frac{G}{G^{G+1}}} \right)$ $G = 0,124 Re \frac{\varepsilon}{D} + \ln(0,4587 Re)$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Rao e Kumar (22)	2007	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left[ \frac{\left(2 \frac{\varepsilon}{D}\right)^{-1}}{\left(\frac{0,444 + 0,135 Re}{Re}\right) \beta} \right]$ $\beta = 1 - 0,55 e^{-0,33 \left[\ln\left(\frac{Re}{6,5}\right)\right]^2}$	Não especificado
Buzzelli (23)	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 (24)	2008	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,8686 \ln \left[ \frac{0,4587 Re}{(S - 0,31) \left(\frac{S}{S + 0,9633}\right)} \right]$ $S = 0,124 Re \left(\frac{\varepsilon}{D}\right) + \ln(0,4587 Re)$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Avci e Karagoz (25)	2009	$f = \frac{6,4}{\left\{ \ln(Re) - \ln \left[ 1 + 0,01 Re \frac{\varepsilon}{D} \left( 1 + 10 \sqrt{\frac{\varepsilon}{D}} \right) \right] \right\}^{2,4}}$	Não especificado
Papaevangelou et al. (26)	2010	$f = \frac{0,2479 - 0,0000947(7 - \log Re)^4}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon}{3,615D} + \frac{7,366}{Re^{0,9142}} \right) \right]^2}$	$10^4 \leq Re \leq 10^7$ $10^{-5} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-3}$
Brkić (27)	2011 a	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2,18 \beta}{Re} + \frac{\varepsilon}{3,71D} \right)$ $\beta = \ln \frac{Re}{1,816 \ln \left[ \frac{1,1 Re}{\ln(1 + 1,1 Re)} \right]}$	Não especificado
Fang et al. (28)	2011	$f = 1,613 \left\{ \ln \left[ 0,234 \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{1,1007} - \frac{60,525}{Re^{1,1105}} + \frac{56,291}{Re^{1,0712}} \right] \right\}^{-2}$	$3 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$

Tabela 4 - Aproximações explícitas para determinação do coeficiente de perda de carga ( $f$ ), com seus respectivos autores, ano de publicação e intervalo de aplicação.

Referência/Nº equação	Ano	Equação explícita do coeficiente “f”	Intervalo aplicável
Ghanbari et al. (29)	2011	$f = \left\{ -1,52 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon}{7,21D} \right)^{1,042} + \left( \frac{2,731}{Re} \right)^{0,9152} \right] \right\}^{-2,169}$	$2.1 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Shaikh et al. (30)	2015	$f = 0,25 \left[ \log \left( \frac{2,51}{\alpha Re} + \frac{\varepsilon}{3,7D} \right) \right]^{-2}$ $\alpha = \left[ 1,14 - 2 \log \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) \right]^{-2}$	$10^4 \leq Re \leq 10^8$ $10^{-4} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$
Brkić (31)	2016	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{2,51 \left( 1,14 - 2 \log \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) \right)}{Re} + \frac{\varepsilon}{3,71D} \right]$ $\frac{1}{\sqrt{f}} =$	$10^6 < Re < 10^8$ $10^{-2} < \varepsilon/D < 5 \times 10^{-2}$
Offor e Alabi (32)	2016 a	$-2 \log \left\{ \frac{\varepsilon}{3,71D} - \frac{1,975}{Re} \left[ \ln \left( \left( \frac{\varepsilon}{3,93D} \right)^{1,092} + \left( \frac{7,627}{Re+395,9} \right) \right) \right] \right\}$	$4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ $0 \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$

Fonte: Autor.

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  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $\varepsilon/D$  variando de  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$  obtendo 160 conjuntos de dados para cada aproximação analisada.

Os valores utilizados da rugosidade relativa abrangem todo intervalo proposto no gráfico de Moody e os valores do número de Reynolds são os que abrangem o regime de fluxo turbulento.

A formulação de Colebrook-White foi escolhida por ser a mais utilizada em cálculos para determinação do coeficiente de perda de carga de Darcy-Weisbach, e, além disso, contempla praticamente todas as faixas de aplicação do número de Reynolds e da rugosidade relativa.

Para a análise estatística dos valores simulados, utilizando o MS Excel, as equações explícitas foram comparadas com a implícita de Colebrook-White, a qual foi selecionada como padrão referencial. Ademais, foi utilizado o software SIGMAPLOT 13.0 para a elaboração das imagens gráficas.

A exatidão foi determinada pelo índice de concordância ( $I_c$ ) proposto por Willmott (1981). Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a um, para a concordância perfeita. O índice de concordância (33) fornece o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas e pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$I_c = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (33)$$

Em que  $E_i$  são os valores estimados,  $O_i$  são os valores observados e  $O$  é a média dos valores observados.

O critério de interpretação e a respectiva classificação do índice de concordância está proposto da Tabela 2.

Tabela 5 - Valores do índice de concordância ( $I_c$ ) e sua respectiva classificação.

<b>Índice de Concordância (<math>I_c</math>)</b>	<b>Classificação</b>
0,95 – 1,00	Excelente
0,89 – 0,95	Ótimo
0,84 – 0,89	Muito bom
0,77 – 0,84	Bom
0,71 – 0,77	Moderadamente bom
0,63 – 0,71	Moderado
0,55 – 0,63	Moderadamente ruim
0,45 – 0,55	Ruim
0,32 – 0,45	Muito ruim
0,00 – 0,32	Péssimo

Fonte: Autor.

O índice de precisão ( $I_p$ ) (34), 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:

$$I_p = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E)(O_i - O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - E)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}} \quad (34)$$

Em que  $E_i$  são os valores estimados,  $O_i$  os valores observados,  $E$  a média dos valores estimados e  $O$  a média dos valores observados.



Quanto mais próximo de 1,0 (positivo ou negativo) maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis, e quanto mais próximo de zero, menor é a força dessa relação (FIGUEIREDO FILHO; JUNIOR, 2010). A classificação da correlação é apresentada na Tabela 3.

Tabela 6 - Valores do índice de precisão (Ip) e a respectiva classificação da correlação.

<b>Índice de Precisão (Ip)</b>	<b>Classificação</b>
0,95 – 1,00	Excelente
0,89 – 0,95	Ótimo
0,84 – 0,89	Muito bom
0,77 – 0,84	Bom
0,71 – 0,77	Moderadamente bom
0,63 – 0,71	Moderado
0,55 – 0,63	Moderadamente ruim
0,45 – 0,55	Ruim
0,32 – 0,45	Muito ruim
0,00 – 0,32	Péssimo

Fonte: Autor.

A avaliação do desempenho das equações foi realizada através do índice de desempenho (Id) (35), adaptado de Camargo e Sentelhas (1997), cujo valor é o produto do índice de concordância (Ic) e do índice de precisão (Ip), expresso por:

$$Id = Ip \cdot Ic \quad (35)$$

O critério de interpretação do índice de desempenho e das respectivas classes de desempenho é apresentado na Tabela 4.

O intervalo de valores empregados nesse estudo para interpretação do “Id” foi menor que os utilizados em classificações existentes na literatura. Isso incide para aumentar a precisão da interpretação desse Índice.

Tabela 7 - Valores do índice de desempenho (Id) e as respectivas classes de desempenho.

<b>Índice de Desempenho (Id)</b>	<b>Classificação</b>
0,90 – 1,00	Excelente
0,80 – 0,90	Ótimo
0,70 – 0,80	Muito bom
0,60 – 0,70	Bom
0,50 – 0,60	Moderadamente bom
0,40 – 0,50	Moderado
0,30 – 0,40	Moderadamente ruim
0,20 – 0,30	Ruim
0,10 – 0,20	Muito ruim
0,00 – 0,10	Péssimo

Fonte: Autor.

Após triagem das equações que tiveram índice de desempenho classificado como “Excelente” foi utilizado o erro relativo (ER) (36), que, segundo Yildirim (2009) e Samadianfard (2012), é um parâmetro muito útil para avaliar praticamente o modelo mais preciso para a estimativa do coeficiente de perda de carga. O ER é expresso por:

$$ER = \left[ \frac{|f_{CW} - f_{explícita}|}{f_{CW}} \right] 100 \quad (36)$$

Em que: ER é o 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).

Para esse estudo utilizou-se a média dos valores do erro relativo (MER) e os quais estão classificados na Tabela 5.

Tabela 8 - Valores da média do erro relativo (MER) e sua respectiva classificação.

<b>Média do Erro Relativo (%)</b>	<b>Classificação</b>
≤ 0,55	Perfeito
0,56 – 1,00	Bom
1,10 – 2,00	Regular
2,10 – 3,00	Fraco
> 3,00	Péssimo

Fonte: Autor.

O erro relativo é um parâmetro de análise estatística utilizado por muitos pesquisadores que trabalham com aproximações implícitas e explícitas do coeficiente de perda de carga, tais como: Sonnad e Goudar (2007); Genić et al. (2011); Brkić (2011b); Dobrnjac (2012); Salmasi et al. (2012); Asker et al. (2014); Rettore Neto et al. (2014); Heydari et al. (2015); Sadeghi et al. (2015); Shaikh et al. (2015); Brkić e Čojbašić (2016); Offor e Alabi (2016a).

As equações explícitas do coeficiente de perda de carga que apresentarem elevado índice de desempenho e baixo erro relativo devem abranger, concomitantemente, um elevado intervalo de aplicabilidade, com  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ . Essa metodologia se aplica porque algumas aproximações altamente precisas são válidas apenas em faixas de  $Re$  e  $\varepsilon/D$  limitadas, podendo, dessa forma, estimar erroneamente o coeficiente de perda de carga.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A determinação do coeficiente de perda de carga ( $f$ ) totalizou 4800 pontos nas 30 aproximações estudadas. Os valores encontrados para “ $f$ ” estão apresentados nos Apêndices A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, BB, CC e DD.

Para análise estatística dos dados foi utilizado o índice de desempenho, o qual considera o índice de concordância e o índice de precisão para sua estimativa. Os valores e a classificação dos índices estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 9 - Valores do índice de concordância ( $I_c$ ), índice de precisão ( $I_p$ ) e índice de desempenho ( $I_d$ ), com suas respectivas classificações, do coeficiente de perda de carga das equações explícitas em relação à Colebrook-White.

<b>Autores/Nº equação</b>	<b><math>I_c</math></b>	<b>Classificação</b>	<b><math>I_p</math></b>	<b>Classificação</b>	<b><math>I_d</math></b>	<b>Classificação</b>
Shacham (12)	0,9999999	Excelente	0,99999	Excelente	0,99999	Excelente
Chen (10)	0,9999997	Excelente	0,99996	Excelente	0,99996	Excelente
Sousa et al. (19)	0,9999997	Excelente	0,99996	Excelente	0,99996	Excelente
Vantankhah e Kouchakzadeh (24)	0,9999997	Excelente	0,99996	Excelente	0,99996	Excelente
Zigrang e Sylvester (14)	0,9999997	Excelente	0,99995	Excelente	0,99995	Excelente
Buzzelli (23)	0,9999997	Excelente	0,99995	Excelente	0,99995	Excelente
Offor e Alabi (32)	0,9999997	Excelente	0,99995	Excelente	0,99995	Excelente
Fang et al. (28)	0,9999996	Excelente	0,99995	Excelente	0,99995	Excelente
Papaevangelou et al. (26)	0,9999996	Excelente	0,99993	Excelente	0,99993	Excelente
Haaland (15)	0,9999992	Excelente	0,99989	Excelente	0,99989	Excelente
Sonnad e Goudar (21)	0,9999993	Excelente	0,99989	Excelente	0,99989	Excelente
Barr (13)	0,9999984	Excelente	0,99982	Excelente	0,99982	Excelente
Manadilli (18)	0,9999984	Excelente	0,99980	Excelente	0,99980	Excelente
Brkić (27)	0,9999980	Excelente	0,99974	Excelente	0,99974	Excelente
Romeo et al. (20)	0,9999979	Excelente	0,99974	Excelente	0,99973	Excelente
Robaina (17)	0,9999980	Excelente	0,99973	Excelente	0,99972	Excelente
Swamee e Jain (9)	0,9999974	Excelente	0,99965	Excelente	0,99965	Excelente
Jain (8)	0,9999977	Excelente	0,99965	Excelente	0,99965	Excelente
Churchill (6)	0,9999974	Excelente	0,99962	Excelente	0,99962	Excelente
Avci e Karagoz (25)	0,9999971	Excelente	0,99960	Excelente	0,99960	Excelente
Eck (7)	0,9999921	Excelente	0,99865	Excelente	0,99864	Excelente
Round (11)	0,9999738	Excelente	0,99863	Excelente	0,99860	Excelente
Wood (5)	0,9999851	Excelente	0,99731	Excelente	0,99730	Excelente

Tabela 10 - Valores do índice de concordância (Ic), índice de precisão (Ip) e índice de desempenho (Id), com suas respectivas classificações, do coeficiente de perda de carga das equações explícitas em relação à Colebrook-White.

<b>Autores/Nº equação</b>	<b>Ic</b>	<b>Classificação</b>	<b>Ip</b>	<b>Classificação</b>	<b>Id</b>	<b>Classificação</b>
Moody (4)	0,9999101	Excelente	0,99358	Excelente	0,99349	Excelente
Ghanbari et al. (29)	0,9999464	Excelente	0,98881	Excelente	0,98875	Excelente
Brkić (31)	0,9999429	Excelente	0,98834	Excelente	0,98828	Excelente
Tsal (16)	0,9996233	Excelente	0,97912	Excelente	0,97875	Excelente
Shaikh et al. (30)	0,9998693	Excelente	0,97687	Excelente	0,97674	Excelente
Rao e Kumar (22)	0,9996399	Excelente	0,93478	Ótima	0,93444	Excelente

Fonte: Autor.

Em relação ao índice de concordância (Ic), todas as equações explícitas (variáveis estimadas) em relação à padrão Colebrook-White (variável observada) apresentaram valores muito próximos de 1,00, enquadrando-se como “Excelente”, possuindo, dessa forma, elevado grau de exatidão entre as variáveis envolvidas.

O índice de precisão (Ip) da maioria das equações explícitas forneceu valores muito próximos a 1,00, demonstrando grande associação das variáveis envolvidas. As equações de Ghanbari et al. (29), Brkić (31), Tsal (16) e Shaikh et al. (30) enquadraram-se como “Excelente”, mas apresentam Ip menor que 0,99. Já Rao e Kumar (22) tiveram valores mais baixos, com Ip = 0,93478, enquadrando-se como “Ótimo”, apresentando correlação mais baixa entre as variáveis envolvidas.

De acordo com o índice de desempenho (Id), todas as equações apresentaram classificação “Excelente”, com valores próximos a 1,00, com exceção de Rao e Kumar (22) que obteve Id = 0,93444.

Analisando em conjunto os coeficientes de desempenho da Tabela 5, pode-se concluir que todas equações explícitas obtiveram um desempenho satisfatório para a estimativa do coeficiente de perda de carga quando comparadas com a equação implícita de Colebrook-White.

Com isso, foi realizada análise estatística através do erro relativo (ER), em que as equações explícitas foram comparadas com a equação padrão de Colebrook-White gerando, cada uma, 160 valores de erro relativo.

A Tabela 7 apresenta a média dos valores do erro relativo (MER) e sua classificação para cada equação explícita analisada em relação à padrão Colebrook-White.

Tabela 11 - Valores da média do erro relativo (MER) das equações explícitas em relação à Colebrook-White e a respectiva classificação do mesmo.

<b>Autores/Nº equação</b>	<b>MER (%)</b>	<b>Classificação</b>
Offor e Alabi (32)	0,30	Perfeito
Shacham (12)	0,32	Perfeito
Buzzeli (23)	0,34	Perfeito
Chen (10)	0,35	Perfeito
Sousa et al. (19)	0,35	Perfeito
Vantankhah e Kouchakzadeh (24)	0,36	Perfeito
Zigrang e Sylvester (14)	0,36	Perfeito
Fang et al. (28)	0,43	Perfeito
Papaevangelou et al. (26)	0,45	Perfeito
Sonnad e Goudar (21)	0,52	Perfeito
Haaland (15)	0,70	Bom
Barr (13)	0,73	Bom
Manadilli (18)	0,74	Bom
Romeo et al. (20)	0,80	Bom
Brkić (27)	0,81	Bom
Jain (8)	0,83	Bom
Robaina (17)	0,84	Bom
Churchill (6)	0,89	Bom
Swamee e Jain (9)	0,93	Bom
Avci e Karagoz (25)	1,18	Regular
Eck (7)	2,23	Fraco
Round (11)	3,71	Péssimo
Wood (5)	3,71	Péssimo
Brkić (31)	3,87	Péssimo
Moody (4)	4,76	Péssimo
Ghanbari et al. (29)	4,78	Péssimo
Tsal (16)	8,95	Péssimo
Shaikh et al. (30)	10,24	Péssimo
Rao e Kumar (22)	16,15	Péssimo

Fonte: Autor.

Uma análise da média do erro relativo (MER) permite concluir que, aproximadamente, 34,5% das equações apresentaram valores classificados como “Perfeito”, 31% classificados como “Bom”, 3,5% “Regular”, 3,5% “Fraco” e 27,5% “Péssimo”, deixando evidente que a maioria das equações apresenta grande precisão para determinação do “ $f$ ” quando comparadas com Colebrook-White.

As aproximações de Offor e Alabi (32), Shacham (12), Buzzeli (23), Chen (10), Sousa et al. (19), Vantankhah e Kouchakzadeh (24), Zigrang e Sylvester (14),

Fang et al. (28), Papaevangelou et al. (26) e Sonnad e Goudar (21) apresentaram MER menores que 0,55%, sendo todos enquadrados como “Perfeito”.

Os modelos Avci e Karagoz (25), Eck (7), Round (11), Woody (5), Brkić (31), Moody (4), Ghanbari et al. (29), Tsal (16), Shaikh et al. (30) e Rao e Kumar (22) apresentaram MER acima de 1,00%, destacando-se os dois últimos por obterem elevada MER, de 10,24% e 16,15%, respectivamente.

Os valores da média dos erros relativos encontrados nesse estudo estão de acordo com Brkić (2011b) que realizou uma revisão de 26 aproximações explícitas baseado no critério de erro relativo (ER) e concluiu que a maioria dos modelos explícitos disponíveis são muito precisos, com exceção dos modelos de Round (1980), Eck (1973), Moody (1947), Wood (1966) e Rao e Kumar (2007).

Para Winning e Coole (2013), quando compararam 28 equações explícitas do “*f*” com a implícita Colebrook-White, as aproximações mais precisas foram as de Zigrang e Sylvester (1982), Romeo et al. (2002) e Buzzelli (2008). Esse estudo encontrou valores semelhantes de precisão, com exceção de Romeo et al. (2002) que apresentou valores mais elevados de erro relativo.

Offor e Alabi (2016b) analisando aproximações explícitas com a equação de Colebrook-White, encontraram, para Vantankhah e Kouchakzadeh (24), valores de erro relativo baixos, o que também foi identificado nesse estudo.

Offor e Alabi (2016a), Winning e Coole (2013) e Brkić (2011a) analisando equações explícitas do coeficiente de perda de carga, constataram que os valores do erro relativo da equação de Rao e Kumar (22) foram os mais elevados em relação a todas equações explícitas analisadas em sua pesquisa, estando coerente com o que foi obtido nessa pesquisa.

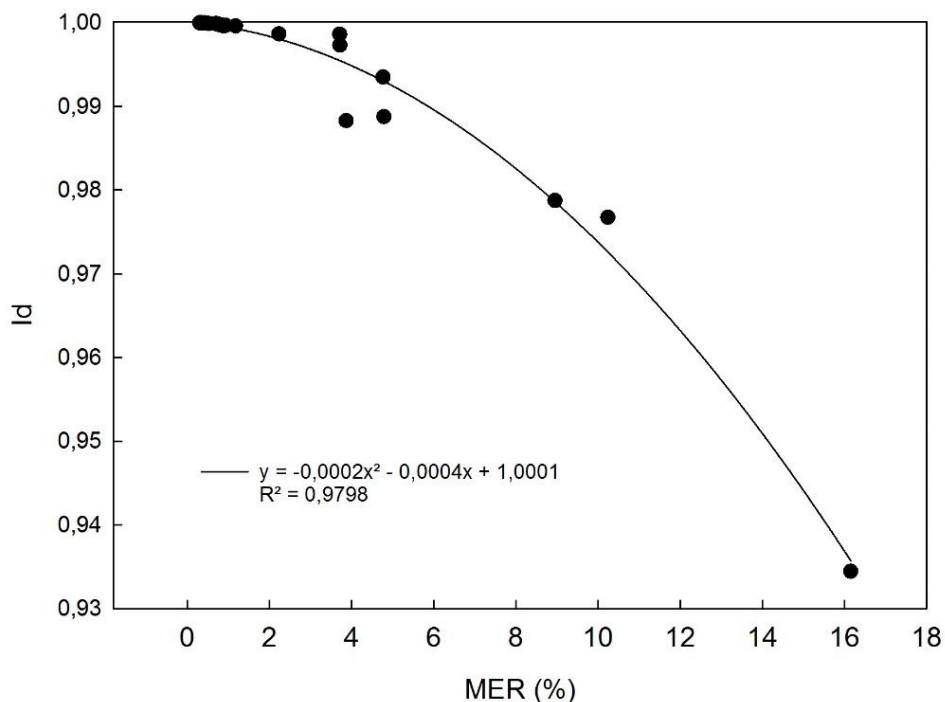
Ghanbari et al. (2011) fizeram sua aproximação da equação de Colebrook-White com base em dados obtidos digitalizando o gráfico de Moody. Nesse estudo, esta aproximação produziu erros mais elevados do que os relatados pelos autores.

Os valores de erro relativo encontrados para a equação de Shaikh et al. (30) não estão de acordo com os apresentados por seus autores, obtendo classificação da média do erro relativo de “Péssimo”.

A discrepância nos valores de erro relativo (ER) encontrados nesse estudo e o proposto pela equação de Brkić (31), deve-se, possivelmente, ao fato de que essa aproximação abrange um limitado intervalo de aplicabilidade de  $Re$  e  $\varepsilon/D$ , compreendendo apenas valores de  $10^6 < Re < 10^8$  e  $10^{-2} < \varepsilon/D < 5 \times 10^{-2}$ .

Na Figura 1 está demonstrado 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.



Fonte: Autor.

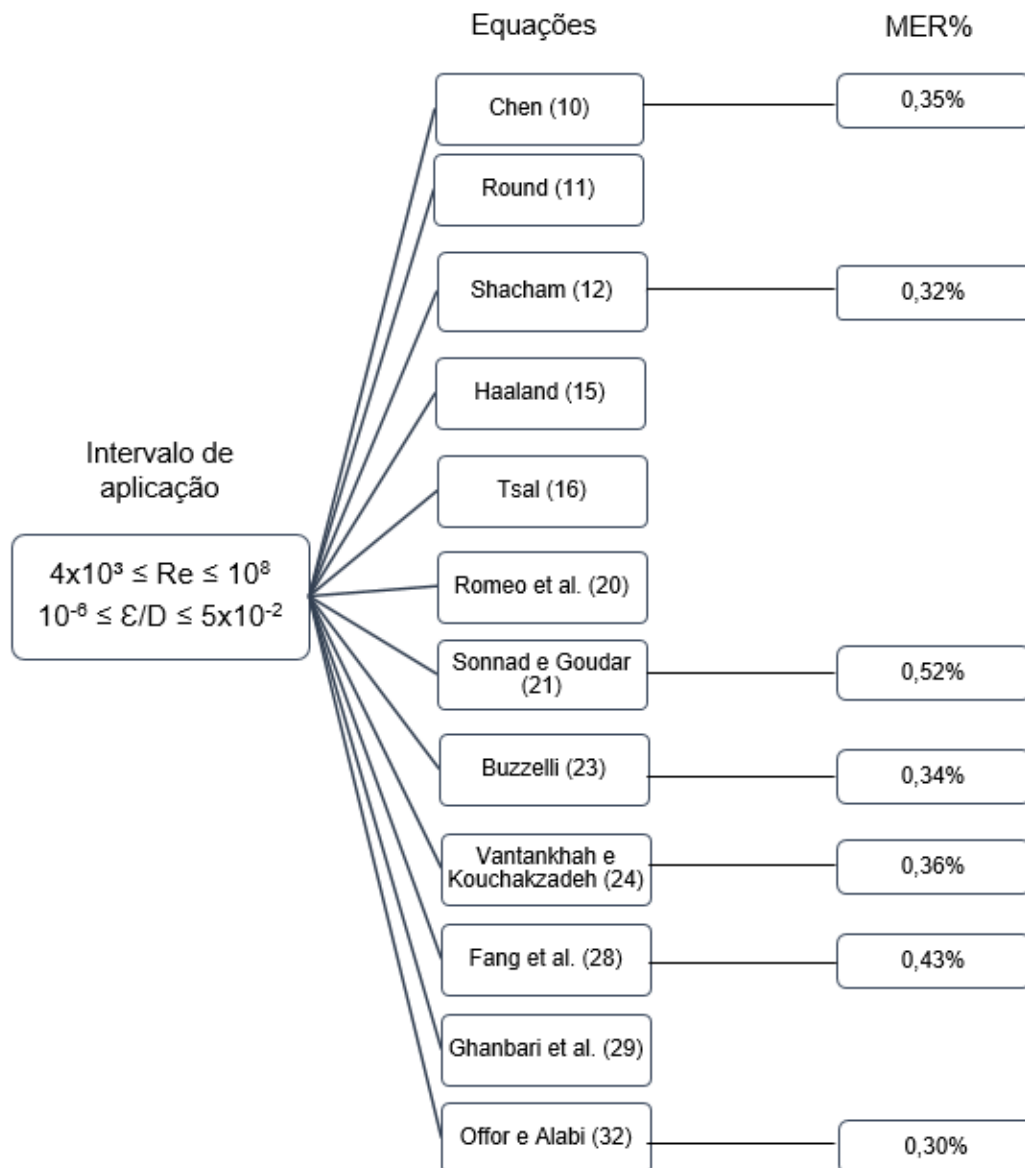
Pode-se destacar, através da Figura 1, que as equações explícitas que tiveram os maiores valores de índice de desempenho obtiveram, também, as menores médias do erro relativo, sendo que, aproximadamente 83% das equações tem  $Id > 0,99$  e 65,5% das equações apresentaram valores da MER (%) menores que 1,00.

Como apenas 27,5% das equações explícitas apresentaram a média do erro relativo classificado como “Péssimo” foi analisada a faixa de aplicabilidade do número de Reynolds ( $Re$ ) e rugosidade relativa ( $\varepsilon/D$ ) que cada equação se enquadra. Para que se aproxime do intervalo de aplicação que a equação de Colebrook-White fornece, apenas as equações explícitas que abrangem  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$  serão válidas.



Das 29 aproximações explícitas do coeficiente de perda de carga analisadas, apenas 12 satisfazem essa condição: Chen (10), Round (11), Shacham (12), Haaland (15), Tsal (16), Romeo et al. (20), Sonnad Goudar (21), Buzzelli (23), Vantankhah e Kouchakzadeh (24), Fang et al. (28), Ghanbari et al. (29) e Offor e Alabi (32). A Figura 2 apresenta as equações que abrangem o intervalo de aplicabilidade determinada para esse estudo com seus respectivos valores da média do erro relativo (%).

Figura 2 - Equações explícitas do coeficiente de perda de carga que se enquadram na faixa de aplicabilidade de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ , e a respectiva média do erro relativo (MER) das que apresentam valores abaixo de 0,55%.



Tendo como principal propósito a busca de equações que tenham elevada precisão quando comparadas com a equação de Colebrook-White, foi determinado que somente as equações explícitas que se enquadram com  $MER < 0,55\%$ , ou seja, classificado como “perfeito”, serão adequadas para substituir a equação implícita padrão para determinação da perda de carga em condutos pressurizados.

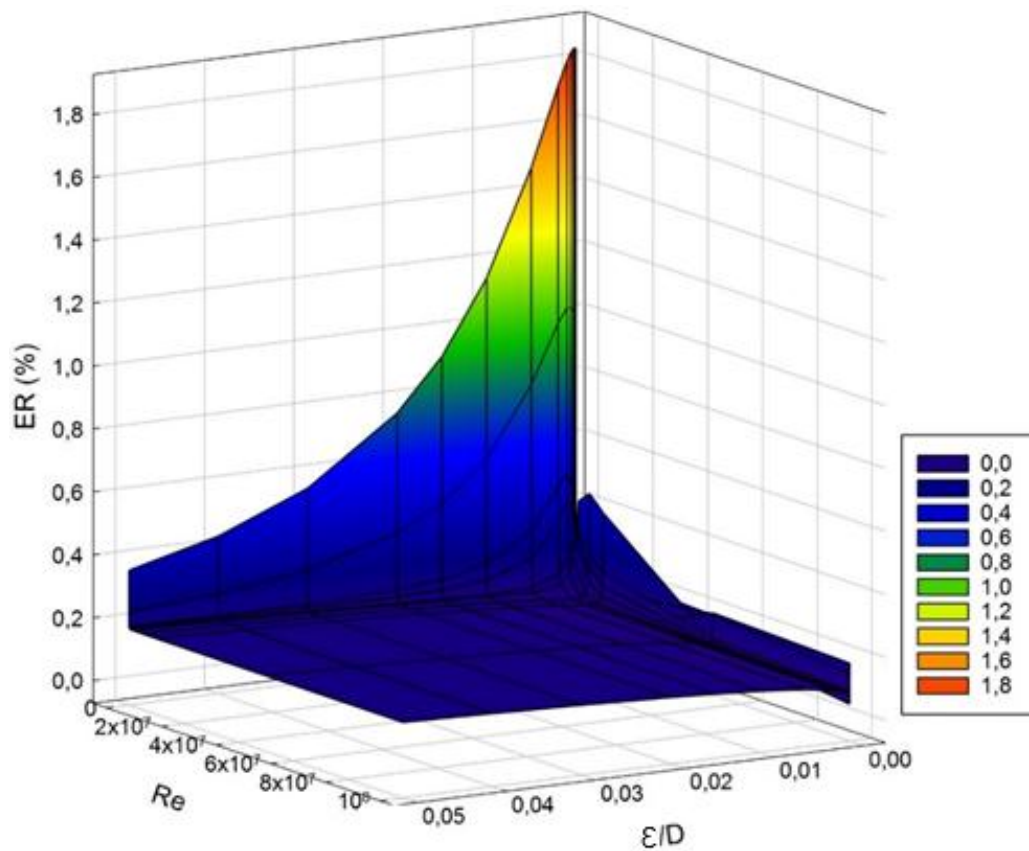
Apenas as equações de Chen (10), Shacham (12), Sonnad Goudar (21), Buzzelli (23), Vantankhah e Kouchakzadeh (24), Fang et al. (28) e Offor e Alabi (32) satisfizeram as condições de classificação da MER como “perfeito”.

Segundo Heydari et al. (2015), a complexidade da aproximação observada é considerada como outro fator importante para examinar a viabilidade de um modelo. Embora geralmente as equações mais simples e menos precisas sejam escolhidas, às vezes as relações altamente precisas e complicadas são favoráveis. Nesse estudo, essa ideia é confirmada, pois as equações mais complexas ou ditas “complicadas” apresentam extrema precisão.

Para essas sete aproximações, apresenta-se, nas Figuras 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, a distribuição do erro relativo (ER) para todo intervalo do número de Reynolds de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e da rugosidade relativa de  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ . Nota-se que, em todas as Figuras apresentadas, para os valores de Re entre  $4 \times 10^3$  e  $2 \times 10^7$  e os valores de  $\varepsilon/D$  entre 0,01 e  $10^{-6}$  os dados ficaram em menor evidência, pois os valores do ER nessas faixas são mais oscilantes do que em valores mais elevados para Re e  $\varepsilon/D$ .

Uma análise conjunta da Figura 3 até a Figura 9 permite inferir que a equação de Sonnad e Goudar (21) apresentou o valor máximo e o valor mínimo do ER em relação as demais, com valores de 3,17% e 0,003%, respectivamente. Além disso, todas as equações apresentaram pequena variação entre o máximo e o mínimo ER, podendo ser utilizadas com precisão para o regime de fluxo turbulento e rugosidade relativa de  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .

Figura 3 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Chen (10) quando comparados a equação de Colebrook-White (3).



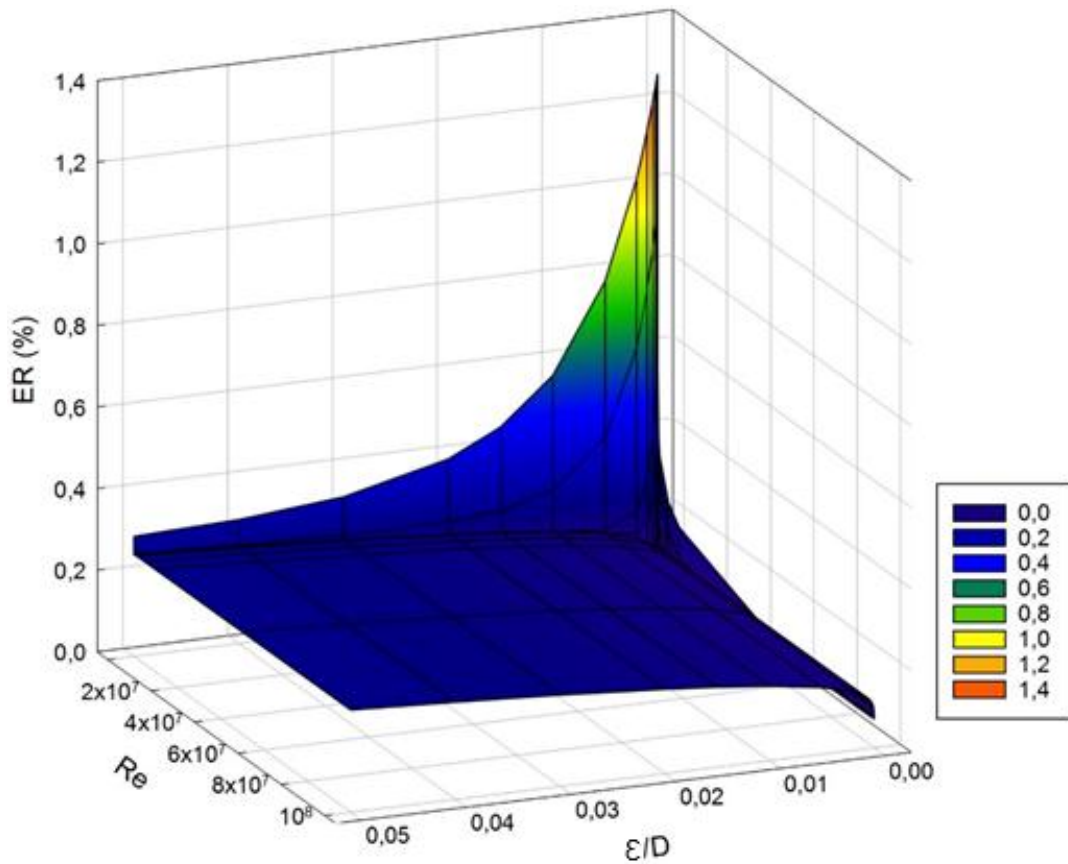
Fonte: Autor.

A Figura 3 permite concluir que quanto mais elevado forem os valores da rugosidade relativa menores serão os valores do erro relativo, para números de Reynolds entre  $4 \times 10^3$  e  $10^4$ . Para valores de Re entre  $10^5$  e  $10^8$ , o ER oscila de acordo com a  $\epsilon/D$ . O valor mínimo de ER é de 0,019% para  $\epsilon/D$  de  $10^{-5}$  e Re de  $5 \times 10^6$ , e o valor máximo de ER é de 1,837% para  $\epsilon/D$  de  $10^{-4}$  e Re de  $4 \times 10^3$ .

A Figura 4 permite observar que a medida que aumentam os valores da rugosidade relativa menores serão os valores do erro relativo, para números de Reynolds entre  $4 \times 10^3$  e  $10^6$ . Para valores de Re acima de  $10^6$ , o ER cresce à medida que aumenta os valores da  $\epsilon/D$ .

O valor mínimo de ER é de 0,069% para  $\epsilon/D$  de  $5 \times 10^{-6}$  e Re de  $5 \times 10^7$ , e o valor máximo de ER é de 1,270% para  $\epsilon/D$  de  $10^{-6}$  e Re de  $4 \times 10^3$ .

Figura 4 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Shacham (12) quando comparados a equação de Colebrook-White (3).

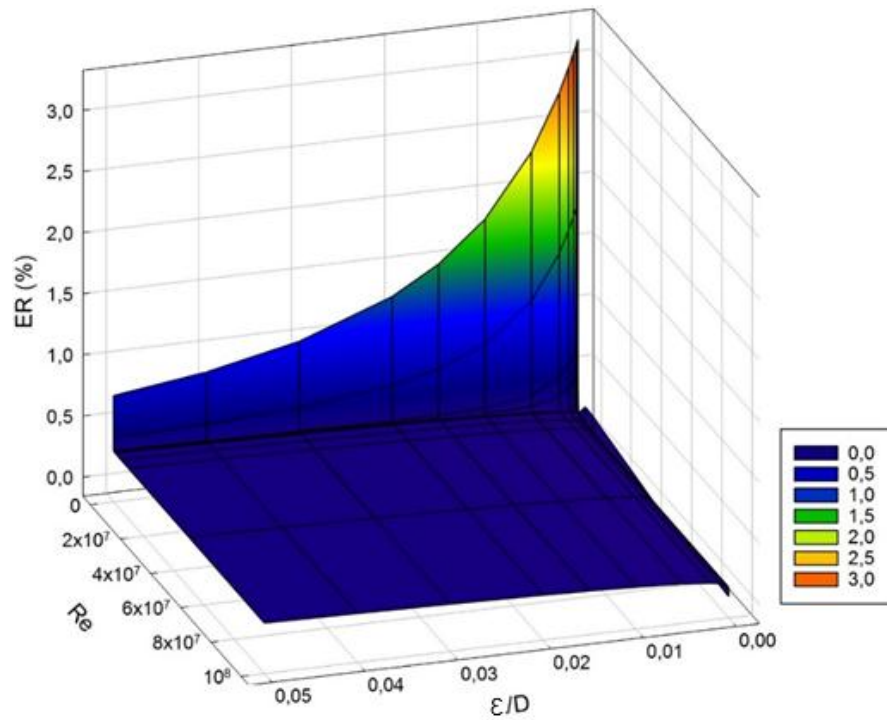


Fonte: Autor.

Diante da Figura 5 é possível determinar que quanto mais elevado forem os valores da rugosidade relativa menores serão os valores do erro relativo, para números de Reynolds entre  $4 \times 10^3$  e  $10^5$ . Para valores de Re acima de  $10^5$ , o ER aumenta à medida que aumenta os valores da  $\epsilon/D$ , tendo pequenas variações.

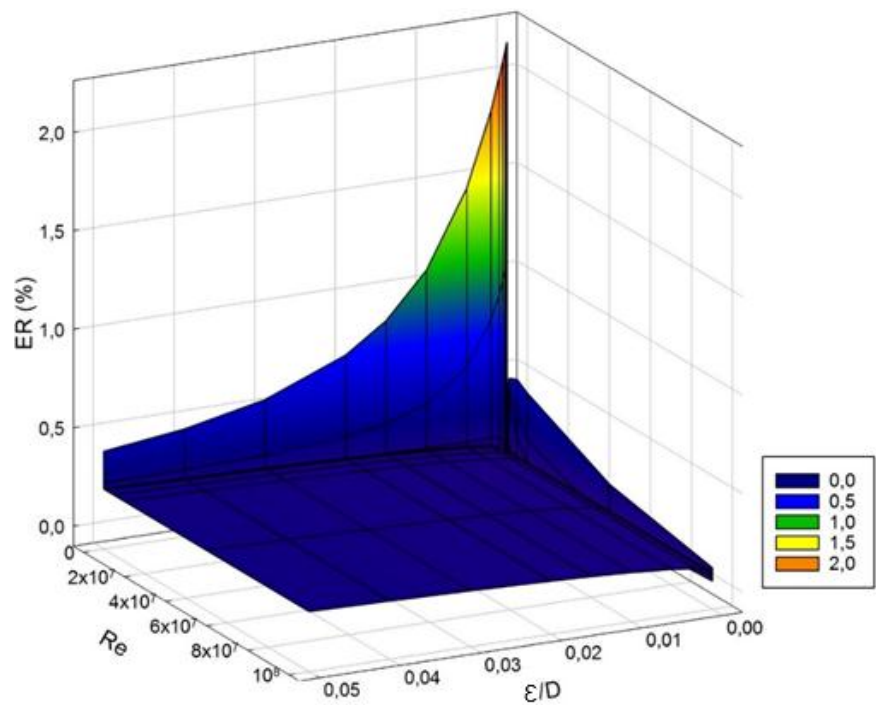
O valor mínimo de ER é de 0,003% para  $\epsilon/D$  de  $10^{-5}$  e Re de  $5 \times 10^5$ , e o valor máximo de ER é de 3,17% para  $\epsilon/D$  de  $10^{-6}$  e Re de  $4 \times 10^3$ .

Figura 5 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Sonnad e Goudar (21) quando comparados a equação de Colebrook-White (3).



Fonte: Autor.

Figura 6 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Buzzelli (23) quando comparados a equação de Colebrook-White (3).

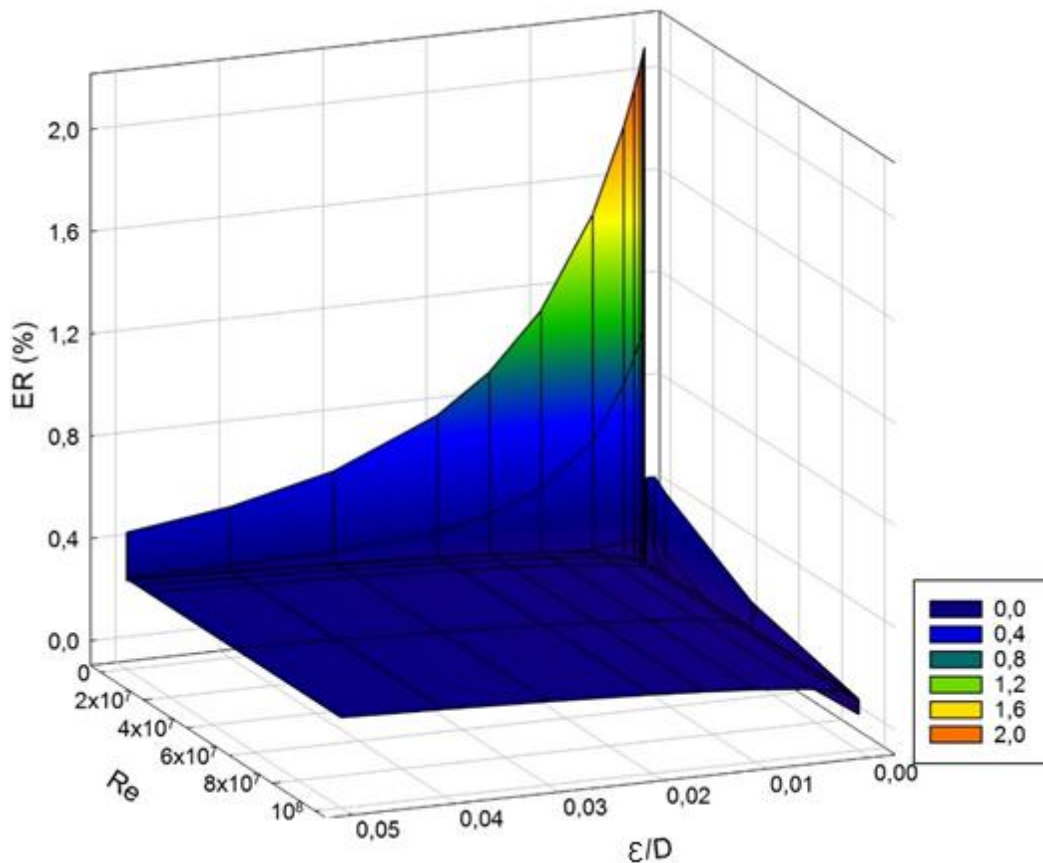


Fonte: Autor.

A partir da Figura 6 permite-se concluir que para  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^4$  quanto mais elevado forem os valores da rugosidade relativa os valores do erro relativo diminuem linearmente. Já para  $10^4 < Re \leq 10^5$ , o ER cresce com o aumento da  $\epsilon/D$ . Esse comportamento muda na faixa de  $10^5 < Re \leq 10^8$  quando o ER oscila de acordo com a  $\epsilon/D$ .

O valor mínimo de ER é de 0,007% para  $\epsilon/D$  de  $5 \times 10^{-6}$  e  $Re$  de  $5 \times 10^7$ , e o valor máximo de ER é de 2,156% para  $\epsilon/D$  de  $10^{-6}$  e  $Re$  de  $4 \times 10^3$ .

Figura 7 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds ( $Re$ ) e rugosidade relativa ( $\epsilon/D$ ) produzido por Vantankhah e Kouchakzadeh (24) quando comparados a equação de Colebrook-White (3).

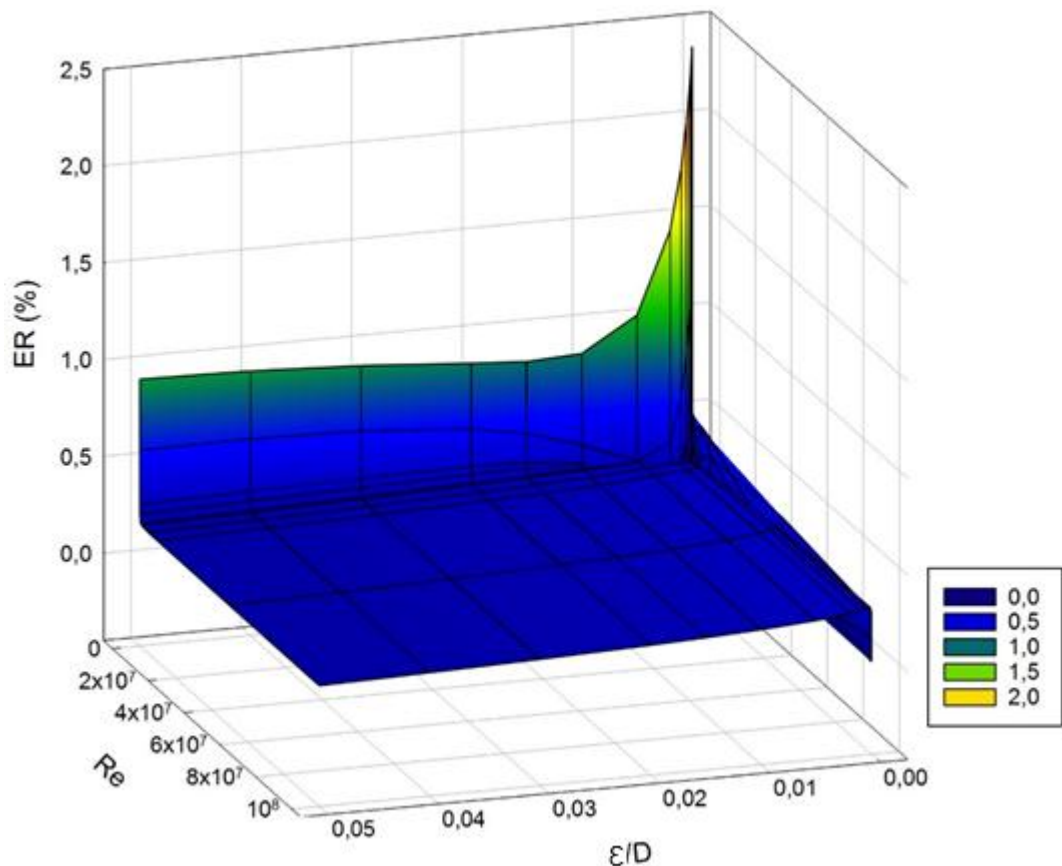


Fonte: Autor.

A Figura 7 demonstra que, quanto mais elevado forem os valores da rugosidade relativa menores serão os valores do erro relativo, para  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^4$ . Para valores de  $10^4 < Re \leq 10^6$ , o ER oscila com os valores de  $\epsilon/D$ . Já para  $10^6 < Re \leq 10^8$ , os valores do ER aumentam quando a  $\epsilon/D$  varia de  $10^{-5}$  a  $10^{-2}$ .

O valor mínimo de ER é de 0,01% para  $\varepsilon/D$  de  $5 \times 10^{-6}$  e Re de  $5 \times 10^7$ , e o valor máximo de ER é de 2,112% para  $\varepsilon/D$  de  $10^{-6}$  e Re de  $4 \times 10^3$ .

Figura 8 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa ( $\varepsilon/D$ ) produzido por Fang et al. (28) quando comparados a equação de Colebrook-White (3).



Fonte: Autor.

A Figura 8 permite inferir que quanto mais elevado forem os valores da rugosidade relativa menores serão os valores do erro relativo, para  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^4$ . Para valores de  $10^4 < Re \leq 5 \times 10^6$ , o ER oscila com os valores de  $\varepsilon/D$ . Já para valores mais elevados de Re, esta equação tem tendência de diminuir o ER a medida que aumenta a  $\varepsilon/D$ .

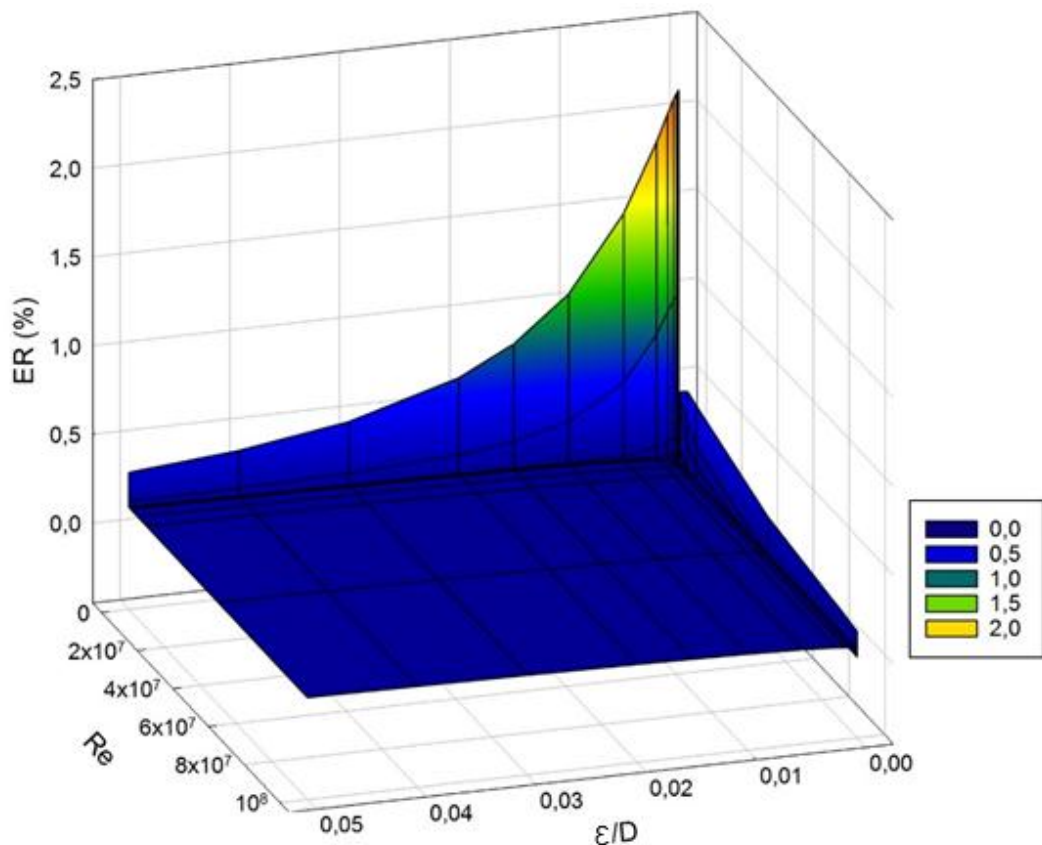
O valor mínimo de ER é de 0,009% para  $\varepsilon/D$  de  $2 \times 10^{-3}$  e Re de  $10^5$ , e o valor máximo de ER é de 2,375% para  $\varepsilon/D$  de  $10^{-6}$  e Re de  $4 \times 10^3$ .

Diante da Figura 9 pode-se concluir que quanto mais elevado forem os valores da rugosidade relativa menores serão os valores do erro relativo, para a faixa de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^4$ . Já para os valores de  $10^4 < Re \leq 10^8$ , essa aproximação tem tendência de elevar os valores do ER a medida que aumenta os valores de  $\varepsilon/D$ .



Os menores erros relativos, ou seja, as maiores precisões, estão entre  $10^5 \leq Re \leq 10^8$  e  $1,5 \times 10^{-2} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-5}$ . O valor mínimo do ER é de 0,005% para  $\varepsilon/D$  de  $5 \times 10^{-6}$  e  $Re$  de  $10^8$ , e o valor máximo do ER é de 2,128% para  $\varepsilon/D$  de  $5 \times 10^{-6}$  e  $Re$  de  $4 \times 10^3$ .

Figura 9 - Distribuição da estimativa do erro relativo (ER%), número de Reynolds ( $Re$ ) e rugosidade relativa ( $\varepsilon/D$ ) produzido por Offor e Alabi (32) quando comparados a equação de Colebrook-White (3).



Fonte: Autor.

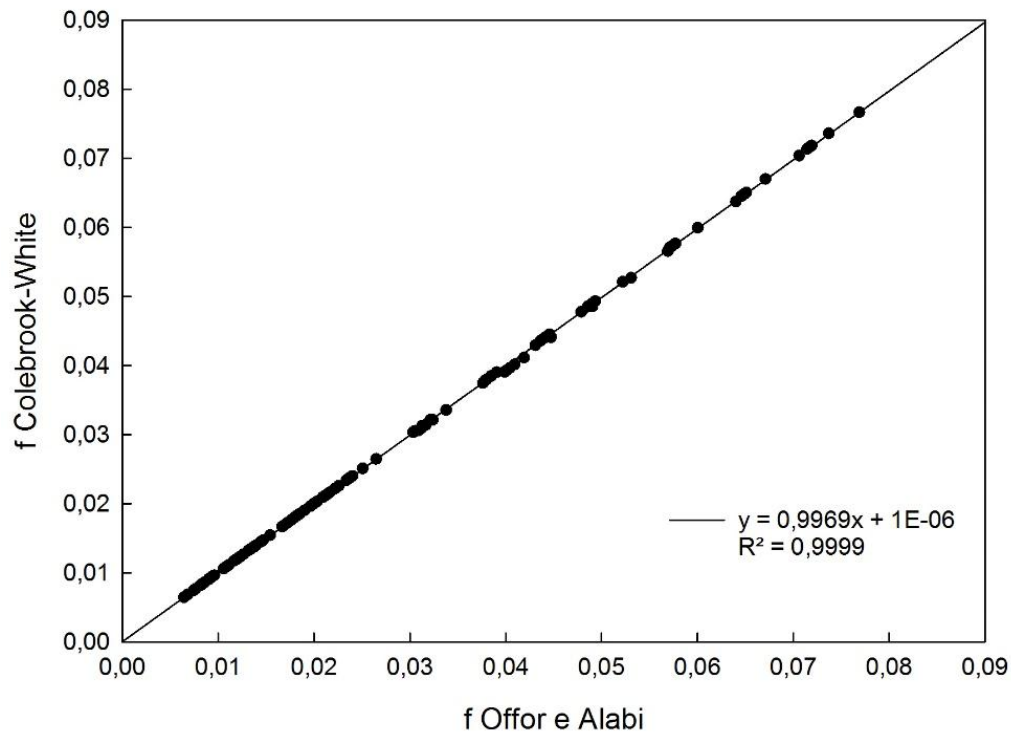
A equação de Offor e Alabi (32) foi a que melhor se enquadrou em todos os resultados estatísticos realizados, sendo considerada extremamente precisa para calcular o coeficiente de perda de carga de Darcy-Weisbach.

Na Figura 10 está representado a reta de regressão dos valores do “ $f$ ” de Offor e Alabi (32) em relação aos valores do “ $f$ ” de Colebrook-White.

Uma análise visual da Figura 10 permite observar a distribuição dos pontos em torno da reta de regressão dos valores do coeficiente de perda de carga de Offor e Alabi (32) comparado com os valores do “ $f$ ” de Colebrook-White (3) apresentam um comportamento similar, isto é, apresenta forte aderência à reta de regressão.



Figura 10 - Valores do coeficiente de perda de carga ( $f$ ) da equação de Offor e Alabi (32) quando comparado com o " $f$ " da equação de Colebrook-White (3).



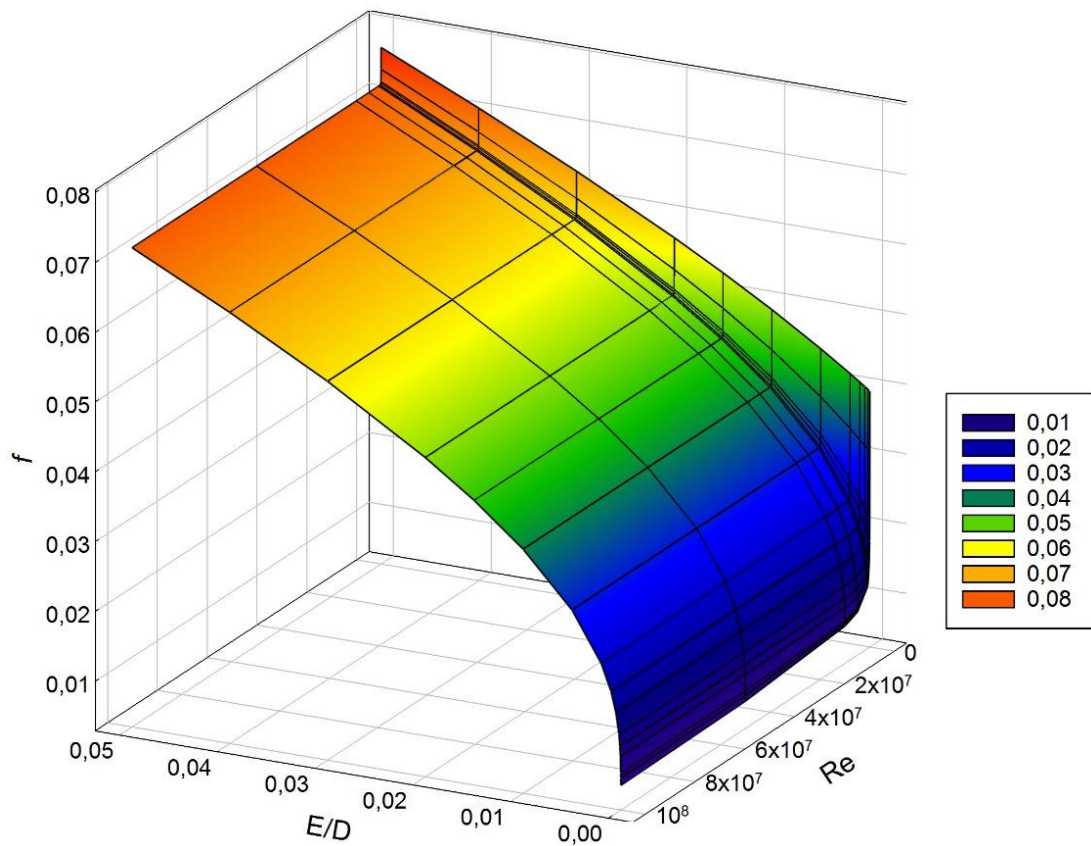
Fonte: Autor.

Observa-se, através da Figura 10, que a análise de regressão forneceu um valor para o coeficiente angular igual a 0,9969 (valor próximo de 1,0) e um coeficiente linear de 0,000001 (valor próximo de zero) e um elevado coeficiente de determinação ( $R^2$  de 0,9999), o que confirma pequena dispersão dos pontos em relação à reta de regressão.

Na Figura 11 está exposto com maiores detalhes o comportamento do coeficiente de perda de carga de Offor e Alabi (32), quando analisado no intervalo de  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \mathcal{E}/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .

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.

Figura 11 - Comportamento do coeficiente de perda de carga ( $f$ ) da equação de Offor e Alabi (32) para regime de fluxo turbulento.



Fonte: Autor.

Ainda na Figura 11, 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).

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com a metodologia proposta neste estudo e os resultados obtidos foi possível concluir que:

1. As equações de Chen (10), Shacham (12), Sonnad Goudar (21), Buzzelli (23), Vantankhah e Kouchakzadeh (24), Fang et al. (28) e Offor e Alabi (32) apresentaram elevados índices de desempenho e elevada precisão quando comparadas com a aproximação de Colebrook-White.

2. A equação de Offor e Alabi (32), em relação aos modelos explícitos analisados, destacou-se, apresentando elevado índice de desempenho e extrema precisão, com média do erro relativo de 0,30%, podendo ser utilizada com alta confiabilidade e substituir o uso da equação implícita de Colebrook-White.

## REFERÊNCIAS

- ANAYA-DURAND, A. I.; CAUICH-SEGOVIA, G. I.; FUNABAZAMA-BÁRCENAS, O.; GRACIA-MEDRANO-BRAVO, V. A. Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. **Educación química**, v. 25, n. 2, p. 128-134, 2014.
- ASSEFA, K. M; KAUSHAL, D. R. A comparative study of friction factor correlations for high concentrate slurry flow in smooth pipes. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 63, n. 1, p.13-20, 2015.
- ASKER, M.; TURGUT, O. E.; COBAN, T. M. A review of non iterative friction factor correlations for the calculation of pressure drops in pipes. **Bitlis Eren University Journal of Science and Technology**, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2014.
- AVCI, A.; KARAGOZ, I. A novel explicit equation for friction factor in smooth and rough pipes. **Journal of Fluids Engineering**, v. 131, n. 6, 2009.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M. **Manual de hidráulica**. 9 ed. São Paulo: Blucher, 632p. 2015.
- BAGARELLO V.; FERRO V.; PROVENZANO G.; PUMO D. Experimental study on flow resistance law for small-diameter plastic pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 121, n. 5, p. 313-316, 1995.
- BARDESTANI, S.; GIVEHCHI, M.; YOUNESI, E.; SAJJADI, S.; SHAMSHIRBAND, S.; PETKOVIC, D. Predicting turbulent flow friction coefficient using ANFIS technique. **Signal, Image and Video Processing**, v. 11, n. 2 p. 341-347, 2017.
- BARR, D. I. H. Solutions of the Colebrook–White function for resistance to uniform turbulent flow. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 71, n. 2, p. 529-536, 1981.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Vicosa: UFV, 625p, 2006.
- BONS, J. P. A review of surface roughness effects in gas turbines. **Journal of turbomachinery**, v. 132, n. 2, 2010.
- BRITTER, R. E.; HANNA, S. R. Flow and dispersion in urban areas. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 35, n. 1, p. 469-496, 2003.
- BRKIĆ, D. New explicit correlations for turbulent flow friction factor. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, n. 9, 2011a.
- BRKIĆ, D. Review of explicit approximations to the Colebrook relation for flow friction. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 77, n. 1, p. 34–48, 2011b.

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. **Preprints**, Suíça, v. 1, 2017.

BUSSE, A.; LÜTZNER, M.; SANDHAM, N. D. Direct numerical simulation of turbulent flow over a rough surface based on a surface scan. **Computers & Fluids**, v. 116, p.129-147, 2015.

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.

CARDOSO, G. G. G.; FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 3, p. 299-305, 2008.

CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, L. F. C. **Instalações de bombeamento para irrigação: hidráulica e consumo de energia**. Lavras: UFLA, 354p, 2008.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos - Fundamentos e aplicações**. Editora Macgraw Hill, 1 ed, 279p, 2007.

CHEN, N. H. An explicit equation for friction factor in pipes. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 18, n. 3, p. 296-297, 1979.

CHURCHILL, S. W. Empirical expressions for the shear stress in turbulent flow in commercial pipe. **AIChE Journal**, v. 19, n. 2, p. 375-376, 1973.

COBAN, 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. Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. **Journal of the Institution of Civil Engineers**, v. 11, n. 4, p.133-156, 1939.

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.

DOBRNJAC, M. Determination of friction coefficient in transition flow region for waterworks and pipelines calculation. **Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara**, v. 10, n. 3, p.137, 2012.

ECK, B. **Technische Stromungslehre**. Springer, New York, 1973.

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.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; JUNIOR, J. A. S. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, 2010.

FINNIGAN, J. Turbulence in plant canopies. **Annual review of fluid mechanics**, v. 32, n. 1, p. 519-571, 2000.

FRIZZONE, J. A.; VIEIRA, A. T.; PAZ, V. P. S.; BOTREL, T. A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p. 278-283, 1998.

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.

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.

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.

HAKTANIR T.; ARDIÇLIOĞLU, M. Numerical modeling of Darcy–Weisbach friction factor and branching pipes problem. **Advances in Engineering Software**, v. 35, n. 12, p. 773-779, 2004.

HAMMAD, M. Product performance: energy performance of plastic pipes. **Polymer Testing**, v. 18, n. 2, p. 111-122, 1999.

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.

JAIN, A. K. Accurate explicit equation for friction factor. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 102, n. 5, p. 674–677, 1976.

JIMENEZ, J. Turbulent flows over rough walls. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 36, p. 173-196, 2004.

KAMAND, F.Z. Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 114, n. 2, p. 311-323, 1988.

LIOU, C. P. Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 124, n. 9, p. 951-954, 1998.

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.

MANADILLI, G. Replace implicit equations with signomial functions. **Chemical Engineering**, v. 104, n. 8, p. 129-129, 1997.

MACDONALD, M.; CHAN, L.; CHUNG, D.; HUTCHINS, N.; OOI, A. Turbulent flow over transitionally rough surfaces with varying roughness densities. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 804, p.130-161, 2016.

MCLAUGHLIN, R. K.; MCLEAN, R. C.; BANTHRON, W. J. **Heating Services Design**. 1 ed. Butterworth & Co, London, Boston, Toronto, 697p, 1981.

MIKATA, Y.; WALCZAK, W. S. Exact analytical solutions of the Colebrook White equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 142, n. 2, 2015.

MOODY, L. F. Friction factors for pipe flow. **Trans. ASME**, v. 66, n.8, p. 671-678, 1944.

MOODY, L. F. An approximate formula for pipe friction factors. **Trans. ASME**, v. 69, n. 12, p. 1005-1011, 1947.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. Tradução de E.J. Zerbini. 4 ed. São Paulo: Blucher, 572p, 2004.

NIKURADSE, J. **Stromungsgesetze in rauhen Rohren. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens**, Forschungsheft 361, Berlin, p. 1-22, 1933.

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.

OKE, I. A.; OJO, S. O.; ADEOSUN, O. O. Performance evaluation for darcy friction factor formulae using colebrook-white as reference. **Ife Journal of Science**, v. 17, n. 1, p. 75-86, 2015.

PAPAEVANGELOU, G.; EVANGELIDES, C.; TZIMOPOULOS, C. A new explicit equation for the friction coefficient in the Darcy–Weisbach equation. In: **Proceedings of the Tenth Conference on Protection and Restoration of the Environment**, v. 166, p. 6-9, 2010.

PERRONI, B. L. T.; FARIA, L. C.; CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, H. F. E. Influência do custo da energia elétrica e do material da tubulação na velocidade econômica de bombeamentos. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 1, p. 13-20, 2015.

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

PRANDTL, L. Turbulenz und ihre Entstehung. **Aeronautical Research Institute**, Tokyo Imperial University, Journal (in Japanese)(notes from lecture given on 21 October 1929 at the Imperial University of Tokyo), translated in PGA, v.2 , p. 787-797, 1930.

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

RAO, A. R.; KUMAR, B. Friction factor for turbulent pipe flow. Division of Mechanical Science. **Civil Engineering Indian Institute of Science Bangalore, India**, 2007.

RESENDE, M. R. **Variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo *Limnoperna fortunei***. 2007. 101p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

RETTORE NETO, O. **Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos**. 2011. 96p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

RETTORE NETO, O.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A.; PINTO, M. F., CAMARGO, A. P. Quantificação do erro na determinação da perda contínua de carga em tubos elásticos. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p.1312-1321, 2013.

RETTORE NETO, O.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A.; CAMARGO, A. P. Method for determining friction head loss along elastic pipes. **Irrigation Science**, v. 32, n. 5, p.329-339, 2014.

REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channel. **Proceedings of the royal society of London**, v. 35, n. 224-226, p. 84-99,1883.

RIBEIRO, P. H. P.; TEIXEIRA, M. B.; COELHO, R. D.; UYEDA, C. A.; DANTAS NETO, J. Caracterização hidráulica e histerese em tubos gotejadores utilizados na irrigação subsuperficial. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 3, p. 430-440, 2014.



ROBAINA, D. A. Análise de equações explícitas para o cálculo do coeficiente “f” da fórmula universal de perda de carga. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.22, n.2, p. 157-159, 1992.

ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZON, A. Improved explicit equation for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. **Chemical engineering jornal**, 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.

SADEGHI, S.; PETERS, R. T.; LAMM, F. R. Design of zero slope microirrigation laterals: Effect of the friction factor variation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 141, n.10, 2015.

SALMASI, F.; KHATIBI, R.; GHORBANI, M. A. A study of friction factor formulation in pipes using artificial intelligence techniques and explicit equations. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v. 36, n. 2, p. 121-138, 2012.

SHACHAM, M. Comment on “Explicit equation for friction factor in pipe”. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 19, n. 5, p. 228-229, 1980.

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.

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.

SCHRODER, F. C. **Levantamento em campo da rugosidade equivalente de tubos metálicos**. 2011. 204p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

SILVA, K. B.; SILVA JUNIOR, M. J.; BATISTA, R. O.; SANTOS, D. B.; BARBOSA FILHO, S. Desempenho de gotejadores operando com efluente da castanha de caju sob distintas pressões de serviço. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n.3, p. 339-346, 2013.

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.

SONNAD, J. R.; GOUDAR, C. T. Explicit reformulation of the Colebrook– White equation for turbulent flow friction factor calculation. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 46, n. 8, p. 2593-2600, 2007.

SOUSA, J.; DA CONCEIÇÃO, M.; MARQUES, A. S. An explicit solution of the Colebrook-White equation through simulated annealing. **Water Industry Systems: modelling and optimization applications**, v. 2, p. 347-355, 1999.

SWAMEE, P. K.; JAIN, A. K. Explicit equations for pipe flow problems. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 102, p. 657-664, 1976.

TALER, D. Determining velocity and friction factor for turbulent flow in smooth tubes. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 105, p. 109-122, 2016.

TELLES, P. C. S. **Tubulações industriais - Cálculo**. Editora LTC, 8 ed, 1994.  
TSAL R. J. Altshul-Tsal friction factor equation. **Heating Piping Air Conditioning**, v. 8, p. 30-45, 1989.

URIBE, J.; SALDARRIAGA, J.; PÁEZ, D. Effects of the use of Hazen-Williams equation on large WDS planning models. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2015**, p. 881-889, 2015.

VALIANTZAS, J. D. Modified Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 4, p. 342-350, 2005.

VATANKHAH, A. R. Comment on “Gene expression programming analysis of implicit Colebrook-White equation in turbulent flow friction factor calculation”. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 124, p. 402-405, 2014.

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.

VON BERNUTH, R. D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. **Journal of irrigation and Drainage engineering**, v. 116, n. 2, p. 294-298, 1990.

VON KÁRMÁN, Th. Mechanische Ähnlichkeit und turbulenz. **Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse**, p. 58-76, 1930.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. Editora Macgraw Hill, 7 ed, 347p, 2009.

WILLIAMS, G. S.; HAZEN, A. **Hydraulic tables**, 3 ed., New York, p. 1-8, 1933.

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.

WOOD, D. J. An explicit friction factor relationship. **Civil Engineering**, v. 36, n. 12, p. 60-61, 1966.

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.

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.

ZIGRANG, D. J.; SYLVESTER, N. D. Explicit approximations to the solution of Colebrook's friction factor equation. **AIChE Journal**, v. 28, n. 3, p. 514-515, 1982.

ZITTERELL, D. B.; FRIZZONE, J. A.; RETTORE NETO, O.; ULLMANN, M. N. Perda de carga em microtubos e conectores utilizados em microaspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 591-604, 2009.



**APÊNDICE C – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE WOODY (5) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,029	0,024	0,017	0,015	0,011	0,010	0,008	0,008	0,006	0,006
0,000005	0,036	0,028	0,019	0,017	0,013	0,011	0,009	0,009	0,008	0,007
0,00001	0,038	0,030	0,020	0,017	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,042	0,032	0,021	0,018	0,014	0,013	0,012	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,043	0,032	0,021	0,019	0,015	0,014	0,013	0,013	0,012	0,012
0,0002	0,042	0,032	0,022	0,019	0,016	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,042	0,031	0,023	0,021	0,019	0,018	0,018	0,018	0,017	0,017
0,001	0,041	0,032	0,024	0,023	0,021	0,021	0,021	0,021	0,020	0,020
0,002	0,041	0,033	0,027	0,026	0,025	0,025	0,024	0,024	0,024	0,024
0,005	0,043	0,037	0,033	0,032	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031
0,01	0,047	0,042	0,040	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
0,015	0,051	0,047	0,045	0,045	0,045	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,055	0,052	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
0,03	0,063	0,060	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
0,04	0,070	0,068	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
0,05	0,077	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074

**APÊNDICE D – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE CHURCHILL (6) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,041	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,007
0,000005	0,041	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,008
0,00001	0,041	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,041	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,041	0,031	0,021	0,018	0,014	0,014	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,041	0,031	0,022	0,019	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,041	0,032	0,023	0,020	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,042	0,033	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,043	0,034	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,046	0,038	0,033	0,032	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,051	0,044	0,039	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,055	0,049	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,059	0,053	0,050	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,066	0,061	0,058	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,073	0,068	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,079	0,075	0,072	0,072	0,072	0,072	0,071	0,071	0,071	0,071

**APÊNDICE E – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE ECK (7) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,042	0,031	0,020	0,017	0,012	0,011	0,008	0,008	0,006	0,006
0,000005	0,042	0,031	0,020	0,017	0,012	0,011	0,009	0,008	0,007	0,007
0,00001	0,042	0,031	0,020	0,017	0,012	0,011	0,009	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,043	0,031	0,020	0,017	0,013	0,012	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,043	0,032	0,021	0,018	0,014	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,043	0,032	0,021	0,018	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,043	0,032	0,022	0,020	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,044	0,033	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,045	0,035	0,026	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,048	0,039	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,052	0,044	0,039	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,056	0,049	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,060	0,053	0,050	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,067	0,061	0,058	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,074	0,068	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,080	0,075	0,072	0,072	0,072	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071

**APÊNDICE F – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE JAIN (8) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,041	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,007
0,000005	0,041	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,008
0,00001	0,041	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,041	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,041	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,041	0,031	0,022	0,019	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,041	0,032	0,023	0,020	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,042	0,033	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,043	0,034	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,046	0,038	0,032	0,032	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,051	0,044	0,039	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,055	0,049	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,059	0,053	0,050	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,066	0,061	0,058	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,073	0,068	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,079	0,075	0,072	0,072	0,072	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071

**APÊNDICE G – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE SWAMEE E JAIN (9) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,041	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,007
0,000005	0,041	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,008
0,00001	0,041	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,041	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,041	0,031	0,021	0,018	0,014	0,014	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,041	0,031	0,022	0,019	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,041	0,032	0,023	0,020	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,042	0,033	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,043	0,034	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,046	0,038	0,033	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,051	0,044	0,039	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,055	0,049	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,059	0,053	0,050	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,066	0,061	0,058	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,073	0,068	0,066	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,079	0,075	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072

**APÊNDICE H – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE CHEN (10) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006
0,000005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,007
0,00001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,040	0,031	0,021	0,019	0,014	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,040	0,031	0,022	0,019	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,040	0,032	0,023	0,020	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,041	0,032	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,042	0,034	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,045	0,038	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,049	0,043	0,039	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,053	0,048	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,057	0,052	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,064	0,060	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,071	0,067	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,077	0,074	0,072	0,072	0,072	0,072	0,071	0,071	0,071	0,071











**APÊNDICE Q – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE SOUSA et al. (19) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006
0,000005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,007
0,00001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,040	0,031	0,021	0,019	0,014	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,040	0,031	0,022	0,019	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,040	0,032	0,023	0,020	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,041	0,032	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,042	0,034	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,045	0,038	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,049	0,043	0,039	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,053	0,048	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,057	0,052	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,064	0,060	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,071	0,067	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,077	0,074	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072

**APÊNDICE R – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE ROMEO et al. (20) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006
0,000005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,007
0,00001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,040	0,031	0,021	0,019	0,015	0,014	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,040	0,031	0,022	0,019	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,041	0,032	0,023	0,021	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,041	0,033	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,042	0,034	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,046	0,038	0,033	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,050	0,044	0,040	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,055	0,049	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,059	0,053	0,050	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,066	0,061	0,058	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,073	0,069	0,066	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,079	0,075	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,071	0,071	0,071







**APÊNDICE Y – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE BRKIĆ (27) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006
0,000005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,007
0,00001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,040	0,031	0,021	0,019	0,015	0,014	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,040	0,031	0,022	0,019	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,041	0,032	0,023	0,021	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,041	0,033	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,042	0,034	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,046	0,038	0,033	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,050	0,044	0,039	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,055	0,049	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,059	0,053	0,050	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,066	0,061	0,058	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,073	0,068	0,066	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,079	0,075	0,072	0,072	0,072	0,072	0,071	0,071	0,071	0,071

**APÊNDICE Z – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE FANG et al. (28) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006
0,000005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,007
0,00001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,040	0,031	0,022	0,019	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,040	0,032	0,022	0,020	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,041	0,032	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,042	0,034	0,026	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,045	0,038	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,049	0,043	0,039	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,053	0,048	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,057	0,052	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,064	0,060	0,058	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,071	0,067	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,077	0,074	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,071	0,071	0,071



**APÊNDICE AA – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE GHANBARI et al. (29) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006
0,000005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,007
0,00001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,040	0,031	0,021	0,019	0,015	0,014	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,040	0,031	0,022	0,019	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,041	0,032	0,023	0,021	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,041	0,033	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,042	0,034	0,027	0,025	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
0,005	0,045	0,038	0,032	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,049	0,043	0,039	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,053	0,048	0,045	0,044	0,044	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
0,02	0,057	0,052	0,049	0,049	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
0,03	0,064	0,060	0,057	0,057	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
0,04	0,070	0,066	0,064	0,064	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063
0,05	0,076	0,072	0,070	0,070	0,070	0,070	0,069	0,069	0,069	0,069

**APÊNDICE BB – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE SHAIKH et al. (30) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,024	0,019	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006	0,006	0,006
0,000005	0,024	0,019	0,013	0,012	0,009	0,008	0,008	0,007	0,007	0,007
0,00001	0,024	0,019	0,014	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008	0,008	0,008
0,00005	0,024	0,019	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,025	0,020	0,015	0,014	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,025	0,020	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,026	0,022	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,027	0,023	0,021	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,030	0,026	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,035	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,042	0,040	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,048	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,053	0,051	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,063	0,060	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,078	0,070	0,066	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,078	0,055	0,069	0,070	0,071	0,071	0,071	0,072	0,072	0,072

**APÊNDICE CC – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE BRKIĆ (31) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

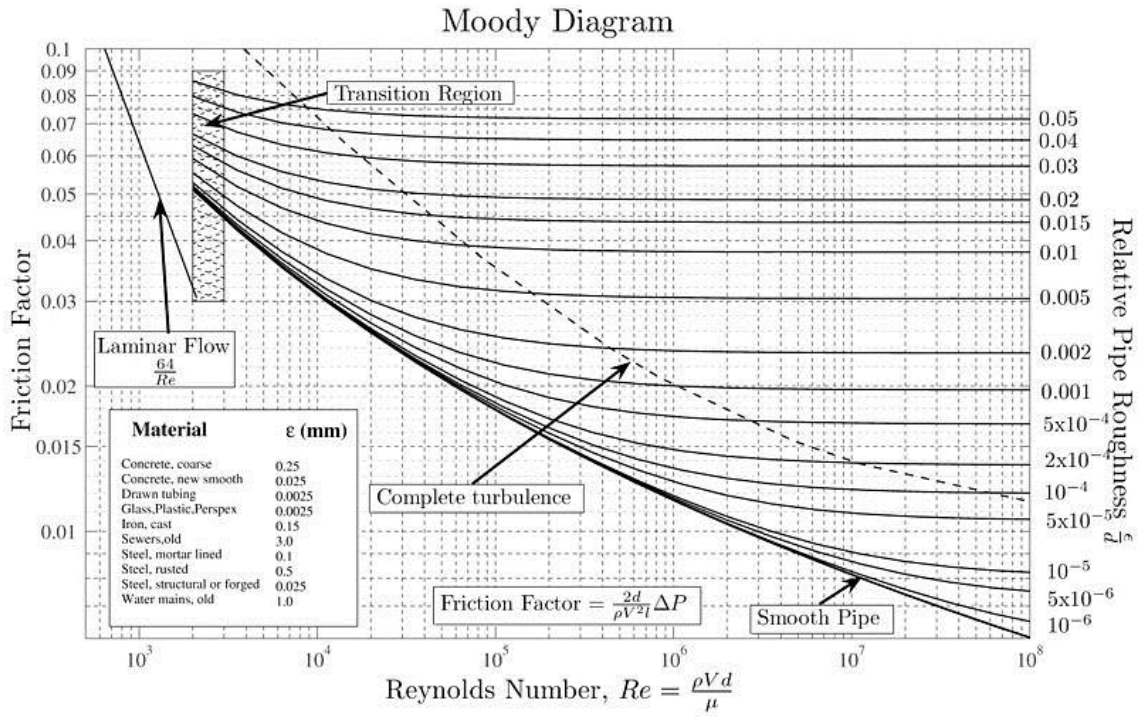
$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,058	0,041	0,025	0,021	0,014	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006
0,000005	0,055	0,039	0,024	0,020	0,014	0,012	0,009	0,009	0,008	0,007
0,00001	0,054	0,038	0,024	0,020	0,014	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,051	0,037	0,023	0,019	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,050	0,036	0,023	0,019	0,015	0,014	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,049	0,035	0,023	0,020	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,047	0,035	0,023	0,021	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,046	0,035	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,046	0,035	0,027	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,047	0,038	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,050	0,043	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,054	0,048	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,058	0,052	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,064	0,060	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,071	0,067	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,077	0,074	0,072	0,072	0,072	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071

**APÊNDICE DD – VALORES DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA ( $f$ ) PARA A EQUAÇÃO DE OFFOR E ALABI (32) COM  $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 5 \times 10^{-2}$ .**

$\varepsilon/D / Re$	$4 \times 10^3$	$10^4$	$5 \times 10^4$	$10^5$	$5 \times 10^5$	$10^6$	$5 \times 10^6$	$10^7$	$5 \times 10^7$	$10^8$
0,000001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006
0,000005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,009	0,009	0,008	0,007
0,00001	0,040	0,031	0,021	0,018	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,008
0,00005	0,040	0,031	0,021	0,018	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,011
0,0001	0,040	0,031	0,021	0,019	0,014	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012
0,0002	0,040	0,031	0,022	0,019	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014
0,0005	0,040	0,032	0,023	0,020	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0,001	0,041	0,032	0,024	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
0,002	0,042	0,034	0,026	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
0,005	0,045	0,038	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
0,01	0,049	0,043	0,039	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
0,015	0,053	0,048	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
0,02	0,057	0,052	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
0,03	0,064	0,060	0,058	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
0,04	0,071	0,067	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
0,05	0,077	0,074	0,072	0,072	0,072	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071

# ANEXOS

## ANEXO A – GRÁFICO DE MOODY.



Fonte: Adaptado de Moody (1947).