

Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros

Gabriel Greco Guimarães Cardoso¹, José Antônio Frizzone^{1*} e Roberto Rezende²

¹Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil. ²Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: frizzone@esalq.usp.br

RESUMO. Este trabalho reporta aos resultados de um experimento sobre perda de carga e fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. Utilizaram-se cinco tubos com os seguintes diâmetros internos: 10,0 mm, 12,9 mm, 16,1 mm, 17,4 mm e 19,7 mm. O experimento foi conduzido para números de Reynolds, no intervalo de 6000 a 72000, obtidos pela variação da vazão nos tubos, a uma temperatura média da água de 20°C. Os resultados foram analisados e, de acordo com as condições experimentais, o fator de atrito f da equação de Darcy-Weisbach pode ser estimado com $c = 0,300$ e $m = 0,25$. A equação de Blasius ($c = 0,316$ e $m = 0,25$) superestimou os valores do fator de atrito para todos os tubos analisados, porém esse fato não constitui limitação para sua utilização em projetos de microirrigação. As análises mostraram que as duas equações proporcionam estimativas do fator de atrito com pequeno desvio-médio (5,1%).

Palavras-chave: perda de carga, escoamento turbulento, equação de Blasius, equação de Darcy-Weisbach.

ABSTRACT. Friction factor for small diameter polyethylene pipes. On this paper, the results of an experimental study on the hydraulic friction loss for small-diameter polyethylene pipes are reported. The experiment was carried out using a range of Reynolds number between 6000 to 72000, obtained by varying discharge at 20°C water temperature, with internal pipe diameters of 10.0 mm, 12.9 mm, 16.1 mm, 17.4 mm and 19.7 mm. According to the analysis results and experimental conditions, the friction factor (f) of the Darcy-Weisbach equation can be estimated with $c = 0.300$ and $m = 0.25$. The Blasius equation ($c = 0.316$ and $m = 0.25$) gives an overestimate of friction loss, although this fact is non-restrictive for micro-irrigation system designs. The analysis shows that both the Blasius and the adjusted equation parameters allow for accurate friction factor estimates, characterized by low mean error (5.1%).

Key words: head loss, turbulent flow, Blasius equation, Darcy-Weisbach equation.

Introdução

A determinação da perda de carga em tubulações é um fator importante para os projetos de engenharia de irrigação, pois afeta o custo total e o balanço hidráulico do sistema. O diâmetro dos tubos da rede de distribuição de água depende da magnitude da perda de carga admissível no sistema pelo projetista. O custo operacional é afetado inversamente pelo diâmetro dos tubos. Aumentando-se o diâmetro, para uma dada vazão, a perda de carga por unidade de comprimento diminui, reduzindo a energia de bombeamento necessária.

A preferência pela simplicidade matemática, leva muitos projetistas de sistemas de irrigação a utilizarem equações empíricas, como de Hazens-Williams, Manning e Scobey, para determinar as perdas de carga, em vez de utilizar a equação universal de Darcy-Weisbach. Entretanto, uma importante limitação dessas equações empíricas é

que se assume um fator de rugosidade constante para todos os diâmetros e velocidades de escoamento (Kamand, 1988). Em decorrência dessa suposição, a perda de carga calculada pelas equações empíricas pode diferir significativamente daquela calculada pela equação de Darcy-Weisbach, na qual o fator de atrito varia com as condições de escoamento (Bombardelli e Garcia, 2003).

Existe um predomínio de material plástico nas tubulações das redes de distribuição de água de sistemas de microirrigação. Isto porque, para tubulações de pequenos diâmetros, que transportam pequenas vazões, os tubos de plásticos fabricados em polietileno de baixa densidade são economicamente mais competitivos que os tubos dos demais materiais disponíveis no mercado. Em razão desses tubos serem produzidos com material plástico, seus diâmetros podem variar em decorrência das variações na pressão de operação. Isso pode

influenciar na perda de carga real, o que resultaria em alterações nas condições hidráulicas do projeto. Andrade (1990), estudando as características hidráulicas de um tubo perfurado de polietileno com espessura de parede de 200 μm , verificou aumento de 10,67% no diâmetro interno da tubulação, para acréscimo de pressão de 90%, dentro da faixa de operação recomendada pelo fabricante. Considerando que, para uma vazão constante, a perda de carga é inversamente proporcional à quinta potência do diâmetro do tubo, os acréscimos máximos de diâmetros, ocasionados pelo aumento da pressão verificados no experimento de Andrade (1990), reduziriam a perda de carga em até 60,24%, o que poderia alterar sensivelmente as condições hidráulicas de um projeto de microirrigação.

Acréscimos no diâmetro do tubo de polietileno, em função da pressão de operação, também foram observados por Frizzone *et al.* (1998), ao analisarem um tubo gotejador com paredes de 225 μm de espessura. Vilela *et al.* (2003), trabalhando com tubos de polietileno, com diâmetros nominais (DN) de 12 e 20 mm e com espessuras de paredes de 1050 e 1325 μm , respectivamente, observaram influência significativa da pressão de operação no diâmetro dos tubos e relataram que aumentos nos diâmetros internos, em virtude de acréscimos na pressão de operação, podem ocasionar reduções nas perdas de carga superiores a 20%. Para o tubo DN12, houve relação linear entre a pressão e o diâmetro. Para o tubo DN20, cuja classe de pressão é superior ao DN12, a relação foi potencial, representando maior variação de diâmetro interno com as pressões.

Os resultados encontrados por Vilela *et al.* (2003) contrariam a suposição de que tubos com paredes de menor espessura apresentariam maior deformação com a pressão de operação. Além da espessura da parede e do coeficiente de elasticidade do material, outro componente que contribui para explicar esse efeito é a força de deformação que atua nas paredes internas do tubo, que é diretamente proporcional ao diâmetro; portanto, para um comprimento unitário, pressão constante, e mesmo material, no tubo de maior diâmetro atuará maior força na parede interna o que resultará em maior deformação.

O escoamento em tubos está sempre sujeito à resistência hidráulica e à dissipação de energia, representada pela perda de carga, que em escoamentos permanentes e turbulentos de fluidos reais, por meio de tubos de seção cilíndrica, pode ser calculada por diferentes equações, apresentadas na literatura básica de hidráulica (Porto, 1998). A contribuição mais importante, com bases teóricas, é expressa pela equação de Darcy-Weisbach (Kamand,

1988; Bernuth, 1990; Bagarello *et al.*, 1995; Romeo *et al.*, 2002; Sonnad e Goudar, 2006), cuja forma é expressa pela Equação (1):

$$J = f \frac{V^2}{2gD} \quad (1)$$

sendo:

J - perda de carga unitária (L L^{-1});

D - diâmetro do tubo (L);

V - velocidade média do escoamento (L T^{-1});

g - aceleração da gravidade (L T^{-2});

f - fator de atrito, dependente do Número de Reynolds (R) e da rugosidade relativa (ε/D) das paredes do tubo, sendo ε a altura da rugosidade do tubo (L).

A resistência hidráulica, freqüentemente expressa como um fator de atrito (f), constitui a informação básica necessária ao projeto hidráulico. Desde as contribuições pioneiras de Weisbach, em 1845, de Darcy, em 1857, de Boussinesq, em 1877 e de Reynolds, em 1895 (ambos citados no trabalho de Yoo e Singh, 2005), a resistência ao escoamento hidráulico tem sido objeto de muito interesse e investigação. Na equação de Darcy-Weisbach, a estimativa do fator de atrito (f) é essencial para o cálculo da perda de carga em redes de tubulações. Para escoamento laminar ($R < 2000$), o cálculo do fator de atrito é feito pela equação de Hagen-Poiseuille ($f = 64/R$), sendo apenas uma função do número de Reynolds (R), o qual depende exclusivamente das propriedades do fluido, do diâmetro do tubo e da velocidade do escoamento. Porém, para escoamento permanente turbulento, a estimativa do fator de atrito é mais complexa, pois f é uma função da rugosidade relativa (ε/D) das paredes do tubo e do Número de Reynolds (Romeo *et al.*, 2002; Sonnad e Goudar, 2006).

Nos estudos de escoamento turbulento uniforme em tubos comerciais rugosos, a equação de Colebrook-White é a mais utilizada para calcular f (Porto, 1988; Romeo *et al.*, 2002; Yoo e Singh, 2005; Sonnad e Goudar, 2006), sendo válida para $2000 < R < 10^8$ e $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$. Esta equação relaciona o fator de atrito com a rugosidade relativa e com o Número de Reynolds, embora McEnroe (1989) propõe o uso, com vantagens, da equação explícita desenvolvida por Swamee e Jain (1976) para o intervalo $5000 < R < 10^8$, com um erro de 1% sobre a equação de Colebrook-White. Contrariamente à opinião geral, a equação de Colebrook-White não é um método com bases teóricas, e sim uma combinação empírica entre a equação de Prandtl, para escoamento turbulento uniforme em tubos lisos, e a equação de von Karman

para escoamento em tubos rugosos, tendo estas duas bases teóricas. Conforme destaca Bernuth (1988), a equação de Colebrook-White é um arranjo inteiramente empírico, com coeficientes empiricamente determinados, que possui a única vantagem de ser operacional.

A maior desvantagem apontada para a equação de Colebrook-White é que ela é implícita em f e requer soluções por métodos numéricos iterativos como o de Newton-Raphson. Embora o trabalho computacional seja trivial no contexto da capacidade dos computadores atuais, a estimativa de f por métodos iterativos pode aumentar significativamente o trabalho computacional para redes de tubulações complexas em que é necessário o cálculo de múltiplos fatores de atrito. Além disso, o valor inicial atribuído a f e o critério de convergência para as iterações deverão ser selecionados cuidadosamente para se obter exatidão na estimativa. Reconhecendo estas dificuldades, vários autores propuseram aproximações explícitas, tornando-as conveniente para implementações computacionais (Swamee e Jain, 1976; Serghides, 1984; Romeo *et al.*, 2002; Yoo e Singh, 2005; Sonnad e Goudar, 2006).

No caso de escoamento turbulento uniforme em tubos lisos, o tamanho das asperezas não influi sobre a turbulência do escoamento e o coeficiente f independe da rugosidade da parede do tubo. Nas aplicações práticas em projetos de microirrigação, em que as velocidades máximas admissíveis da água nos condutos não ultrapassam $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e os diâmetros das tubulações são inferiores a 80 mm, o número de Reynolds frequentemente é inferior a 10^5 . Nestes casos, o fator de atrito pode ser estimado com boa exatidão por uma equação simples proposta por Blasius (Equação 2), para $4000 \leq R \leq 10^5$, conforme salienta Bernuth (1990):

$$f = \frac{c}{R^m} \quad (2)$$

Blasius, ao propor essa equação para se estimar f , determinou m como uma constante de valor igual a 0,25, enquanto que o coeficiente c seria outra constante de valor igual a 0,316. Para Bernuth (1990), a inserção do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach resulta em uma equação combinada com as seguintes vantagens: (a) possui base teórica e dimensionalmente homogênea. Tanto a equação de Darcy-Weisbach quanto a de Blasius têm bases teóricas; (b) têm bom grau de exatidão para tubos lisos quando $4000 \leq R \leq 10^5$. O número de Reynolds limite não é restritivo para sistemas de irrigação que usam tubos com diâmetros

inferiores a 80 mm; (c) pode ser facilmente corrigida para variações na viscosidade da água. Bernuth (1990) salienta que para R inferior a 4000 a equação de Blasius superestima os valores de f .

Considerando os coeficientes da equação de Blasius, a Equação (1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$J = K v^{0,25} Q^{1,75} D^{-4,75} \quad (3)$$

em que:

V - viscosidade cinemática da água ($1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ à 20°C);

$K = 2,458 \times 10^{-2}$ para o sistema internacional de unidades;

Q - vazão, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$;

D - diâmetro interno do tubo, m.

A determinação dos coeficientes da equação de Blasius também foi motivo de estudo de Bagarello *et al.* (1995). Estes autores, trabalhando com tubos de polietileno de baixa densidade com diâmetros nominais de 16, 20 e 25 mm, variaram o número de Reynolds pela mudança da viscosidade do fluido (R entre 3037 e 31373), ao se alterar a temperatura, obtendo $c = 0,302$ para $m = 0,25$. O valor do coeficiente c foi dado por uma constante que representou a média dos valores para os diâmetros experimentados.

Embora existam métodos teóricos para estimar o fator de atrito, aproximações empíricas, por ensaios de laboratório, são comumente usadas e satisfazem a expectativa de se obter resultados satisfatórios, já que os tubos de polietileno de baixa densidade não são rígidos e podem apresentar desvios do modelo teórico. Várias pesquisas apresentam bons resultados ao se ajustar modelos do tipo potência, semelhantes ao de Blasius (Bernuth, 1990; Bagarello *et al.* 1995; Hathoot *et al.* 1993). Alves (2000) indicou que, no regime de escoamento turbulento em tubos lisos, com R entre 7000 e 40000, a equação de Blasius é uma boa alternativa para determinar o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach, embora os valores observados foram, geralmente, inferiores aos estimados por Blasius.

O objetivo deste trabalho é analisar a perda de carga e o fator de atrito em tubos comerciais de polietileno de baixa densidade, de pequenos diâmetros, utilizados em sistemas de microirrigação.

Material e métodos

Este trabalho foi conduzido no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural - Esalq/USP. No experimento, foram utilizados tubos

de polietileno de baixa densidade, com diâmetros internos de 10,0; 12,9; 16,1; 17,4 e 19,7 mm, com 15 m de comprimento entre os pontos de medição de pressão e com a tubulação em nível. Os diâmetros internos dos tubos foram medidos pelo método volumétrico e conferidos com as medidas realizadas em projetor ótico, modelo HB400-2, fabricado pela Starret Precision Optical. A espessura média da parede de cada um dos tubos foi determinada a partir de 10 anéis tomados perpendicularmente ao eixo longitudinal da tubulação e a mensuração foi feita no projetor ótico. Na Tabela 1, são apresentadas as principais características dos tubos ensaiados. As medições da pressão diferencial foram feitas por um manômetro diferencial com coluna de mercúrio e com menor divisão de escala de 1 mm de Hg. Durante os ensaios, a pressão da água na entrada tubo variou entre 150 kPa e 300 kPa.

A vazão foi controlada por um registro de gaveta acoplado no final da tubulação e medida por um medidor de vazão eletromagnético, modelo KC1000, associado a um conversor de sinais IFC010, ambos fabricados pela Controles Automáticos Ltda (CONAUT). De acordo com as informações do fabricante, esse aparelho apresenta capacidade de leitura de $2,78 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (1 L h^{-1}) e precisão de $\pm 0,14\%$ para vazões compreendidas entre $5,56 \times 10^{-5}$ e $5,56 \times 10^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (200 a 2000 L h^{-1}). Uma motobomba elétrica foi usada para impulsionar a água no circuito, a partir de um reservatório subterrâneo existente no laboratório.

As leituras de pressão diferencial foram feitas entre um intervalo de tempo de 4 minutos, mantendo a vazão sempre crescente. Desta forma, catalogaram-se os dados de vazão e pressão diferencial correspondentes à média de três leituras. Mantendo-se a tubulação em nível, considerou-se a perda de carga no tubo como sendo a diferença de pressão entre as duas extremidades distantes de 15 m. A perda de carga observada foi analisada em função da vazão, utilizando-se um modelo tipo potência, na forma da Equação (5):

$$J = k Q^n \quad (5)$$

sendo:

J - perda de carga unitária (m m^{-1});

Q - vazão em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$;

k e n - constantes.

Foram ajustadas equações com $n = 1,75$ para facilitar a comparação com a equação de Darcy-Weisbach, com f calculado por Blasius (Equação 3).

A determinação do fator de atrito f foi feita pela Equação (1), explicitando-se f em função de J , $V^2/2g$ e D , que são quantidades conhecidas. Por análise de regressão, ajustou-se uma equação potência semelhante à Equação (2). Para facilitar a comparação dos valores de f obtidos experimentalmente com os obtidos pela equação de Blasius, foram ajustados valores da constante c para obter uma equação com $m = 0,25$. Um valor médio do expoente c foi obtido por análise de regressão linear entre os valores de f observados e $R^{0,25}$.

A concordância entre os valores de J e f observados com os valores estimados pela equação de Darcy-Weisbach e pela equação de Blasius, respectivamente, foi analisada pelo índice de ajuste (d) proposto por Willmott (1981). Este é um índice de exatidão. As fórmulas utilizadas para o cálculo do índice d foram as seguintes:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i^*| + |O_i^*|)^2} \quad (6)$$

$$P_i^* = P_i - O_i \quad (7)$$

$$O_i^* = O_i - \bar{O} \quad (8)$$

em que:

d - índice de concordância de Willmott, adimensional, variando entre 0 e 1; o valor 1 denota completo ajustamento entre os valores de J e f observados e estimados e 0 a condição oposta;

P_i - valores estimados pela equação de Darcy-Weisbach (J) e Blasius (f);

O_i - valores de J e f observados;

\bar{O} - média dos valores de J e f observados;

n - número de observações.

Tabela 1. Principais características dos tubos utilizados no experimento e faixa do número de Reynolds (R).

Diâmetro nominal (DN)	Pressão nominal (PN)	Fabricante ¹	Espessura da parede (mm)	Diâmetro interno (mm)	Geometria da seção	Superfície interna	Faixa de número de Reynolds
12	20	Plasnova	0,826	10,0	levemente elíptica	Lisa e polida	6000 - 22000
15	40	Plasnova	1,180	12,9	elíptica	Lisa e polida	7000 - 36000
18	20	Plasnova	0,832	16,1	levemente elíptica	Lisa e polida	10000 - 53000
20	40	Plasnova	1,320	17,4	circular	Lisa e polida	12000 - 58000
22	40	Plasnova	1,540	19,7	circular	Lisa e polida	14000 - 72000

¹ O uso de produtos ou marcas registradas tem a finalidade exclusiva de facilitar a compreensão.

A inferência sobre a precisão das estimativas, em relação aos valores observados, foi feita pelo coeficiente de correlação de Pearson (*r*) (Equação 9). A hierarquização das estimativas foi feita com base nos valores do índice de confiança de Camargo (*c*), conforme apresentado por Camargo e Sentelhas (1997), que consiste do produto entre *d* e *r*.

$$r = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n S_i O_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n S_i \right) \left(\sum_{i=1}^n O_i \right)}{\left\{ \left[n \sum_{i=1}^n S_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n S_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n O_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n O_i \right)^2 \right] \right\}^{1/2}} \quad (9)$$

Resultados e discussão

Perdas de carga distribuídas nos tubos

As Equações (10), (11), (12), (13) e (14) expressam as perdas de carga observadas nos tubos de polietileno, obtidas em experimentos de laboratório, ajustadas em função da vazão. Para todos os tubos, as equações apresentaram coeficientes de determinação da regressão superiores a 0,9995. Os resultados foram obtidos para números de Reynolds (*R*) entre 6224 e 71586 e velocidades médias de escoamento entre 0,57 e 3,68 m s⁻¹. Pode-se verificar que a perda de carga ajustada aos valores observados foi, em geral, menor que os valores calculados pela equação de Darcy-Wiesbach com *f* calculado pela equação de Blasius, exceto para o diâmetro de 10 mm (Tabela 2).

Diâmetro de 10,0 mm $J = 17535686 Q^{1,713}; R^2 = 0,9996$ (10)

Diâmetro de 12,9 mm $J = 485585,9 Q^{1,709}; R^2 = 0,9995$ (11)

Diâmetro de 16,1 mm $J = 245980,7 Q^{1,757}; R^2 = 1,0000$ (12)

Diâmetro de 17,4 mm $J = 180808,3 Q^{1,757}; R^2 = 1,0000$ (13)

Diâmetro de 19,7 mm $J = 98023,0 Q^{1,757}; R^2 = 0,9999$ (14)

O maior desvio médio entre os valores experimentais e os calculados pela equação de Darcy-Wiesbach com *f* de Blasius foi 9,52%, para o diâmetro de 16,1 mm, e o menor -0,12% para o diâmetro de 10 mm, com média geral de 5,39%, sendo que 42% dos desvios foram inferiores a 5%. Esses desvios são considerados aceitáveis por Bernuth e Wilson (1989), Bernuth (1990), Bagarello *et al.* (1995) e Alves (2000). As menores perdas de carga observadas, na maioria dos tubos analisados, em relação à perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, com *f* de Blasius, podem ser explicadas pelo aumento de diâmetro dos tubos de polietileno quando pressurizados, conforme apresentam Frizzone *et al.* (1988) e Vilela *et al.*

(2003). Bagarello *et al.* (1995) atribuem esse efeito também ao fato das paredes internas dos atuais tubos de polietileno serem mais lisas que os tubos de Prandtl utilizados por Blasius para propor o coeficiente *c* (0,316) da Equação (2).

Tabela 2. Diferenças médias percentuais entre as perdas de carga estimadas pelos resultados observados e as perdas de carga calculadas pela equação de Darcy-Weisbach e *f* por Blasius.

Comparações ⁽¹⁾	Diâmetros					Média
	10,0	12,9	16,1	17,4	19,7	
<i>J</i> _{OBS} versus <i>J</i> _{DWB}	-0,12	6,27	9,52	4,69	6,57	5,39
<i>J</i> _{OBS(n=1,75)} versus <i>J</i> _{DWB}	0,48	7,16	9,10	3,93	5,86	5,31

⁽¹⁾*J*_{OBS} - perda de carga estimada pela equação ajustada com os dados observados; *J*_{DWB} - perda de carga estimada pela equação de Darcy-Weisbach com *f* calculado pela equação de Blasius; *J*_{OBS(n=1,75)} - perda de carga estimada pela equação ajustada com os dados experimentais utilizando *n* = 1,75; ⁽²⁾ Para *J*_{OBS} versus *J*_{DWB} = (*J*_{DWB} - *J*_{OBS})/*J*_{DWB}. Para *J*_{OBS(n=1,75)} versus *J*_{DWB} = (*J*_{DWB} - *J*_{OBS(n=1,75)})/*J*_{DWB}.

Na Figura 1, apresentam-se as perdas de carga nos tubos ajustadas com expoente da vazão *n* = 1,75, obtendo-se coeficientes de determinação da regressão superiores a 0,9996. O máximo desvio médio da perda de carga ajustada em relação à calculada por Darcy-Wiesbach com *f* de Blasius foi 9,10% (para o tubo de 16,1 mm) e o menor 0,48% (para o tubo de 10,0 mm), com média 5,31% (Tabela 2), sendo que 55% dos desvios foram inferiores a 5%. A equação de Darcy-Weisbach com *f* calculado por Blasius superestimou os valores de perda de carga para todos os diâmetros analisados, entretanto as diferenças nas estimativas podem ser consideradas aceitáveis para propósitos práticos.

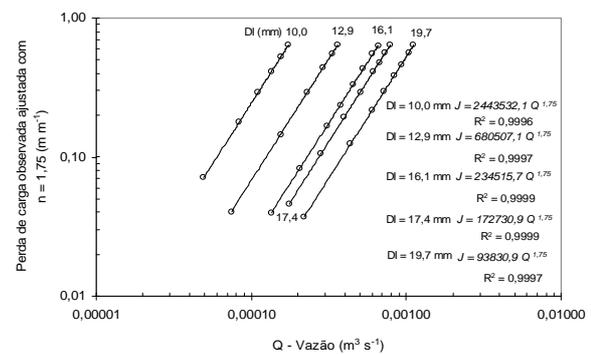


Figura 1. Perda de carga observada, ajustada com *n* = 1,75, em função da vazão para os diferentes diâmetros de tubos.

Na Figura 2, apresenta-se a concordância entre as perdas de carga calculadas pela equação de Darcy-Weisbach com o fator de atrito (*f*) calculado pela equação de Blasius e as perdas de carga observadas. Verifica-se uma proximidade aceitável entre os valores de perda de carga. O índice de desempenho estatístico é considerado “ótimo” (*c* > 0,85), segundo Camargo e Sentelhas (1997). O valor de *c* = 0,9849

indica excelente precisão e exatidão nas estimativas das perdas de carga, embora o modelo proposto por Darcy-Weisbach com f de Blasius tenha superestimado os valores para a maioria dos tubos estudados (Tabela 2).

Fator de atrito

Na Figura 3, estão apresentadas as curvas de f em função de R para os dados experimentais, para o ajuste com $m = 0,25$ e para o modelo de Blasius. Considerando todos os diâmetros analisados, o valor de m foi 0,273 para o ajuste aos dados observados, enquanto essa constante na equação proposta por Alves (2000) foi 0,2657. O valor de c foi 0,377 contra 0,3443 obtido por Alves (2000). Fixando-se o $m = 0,25$, determinou-se um valor de c igual a 0,300 (Figura 3), enquanto Bernuth e Wilson (1989) encontraram um valor de 0,345 para tubos de PVC, Alves (2000) um valor de 0,295 para tubos de polietileno e Bagarello *et al.* (1995) 0,302 também para tubos de polietileno contra 0,316 utilizado na equação de Blasius. Todos os pares (R, f) das funções ajustadas localizam-se abaixo da curva de Blasius (Figura 3), concordando com as observações feitas por Bagarello *et al.* (1995) e Alves (2000). Este fato pode ser justificado pelo aumento de diâmetro dos tubos de polietileno quando submetido à pressão (Vilela *et al.* 2003) e porque os atuais tubos de polietileno apresentam paredes internas mais lisas e polidas que os tubos utilizados por Blasius, conforme justificam Bagarello *et al.* (1995). Entretanto, há evidências de que a causa mais significativa seja o aumento do diâmetro dos tubos de polietileno de baixa densidade em função da pressão.

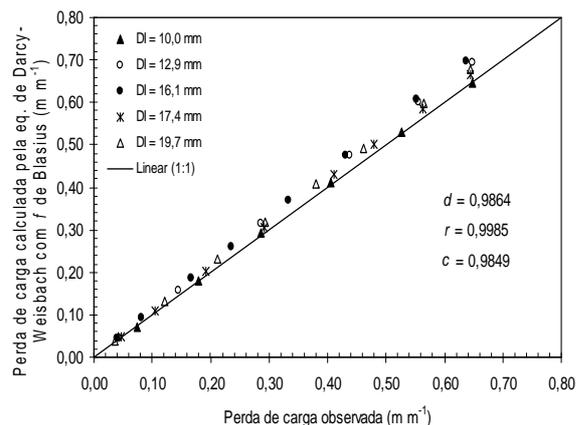


Figura 2. Perda de carga observada e perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, utilizando f calculado pela equação de Blasius.

Nas Figuras 4 e 5, mostra-se a concordância entre os valores de f calculados pela equação de Blasius e os valores experimentais e os ajustados com $m = 0,25$.

Os valores observados estão distribuídos, na maioria dos casos, acima da reta 1:1, exceto para o diâmetro de 10 mm (Figura 4), indicando que a equação de Blasius superestimou os valores de f para os diâmetros superiores a 10,0 mm. Verifica-se também que os valores de f ajustados com $m = 0,25$ estão mais próximos daqueles calculados pela equação de Blasius, porém sempre inferiores a estes (Figura 5). A maior diferença percentual entre os valores de f observados e os valores de f de Blasius foi de 10,26% e a menor foi 0,20%, sendo em média 5,6%, e 42% das diferenças foram inferiores a 5%. Já, a diferença média entre os valores de f calculados por Blasius e f calculados pela equação ajustada com $m = 0,25$ foi 5,1%. Para ambos os casos, o índice c apresentou alto valor, indicando concordância estreita entre os valores de f observados e ajustados com $m = 0,25$ ao modelo de Blasius. Desses resultados, pode-se indicar como melhor alternativa para o cálculo do fator de atrito nos tubos analisados a equação: $f = 0,300 R^{-0,25}$, concordando com os estudos experimentais e semi-teóricos conduzidos por Bagarello *et al.* (1995) que os levaram a propor $c = 0,302$.

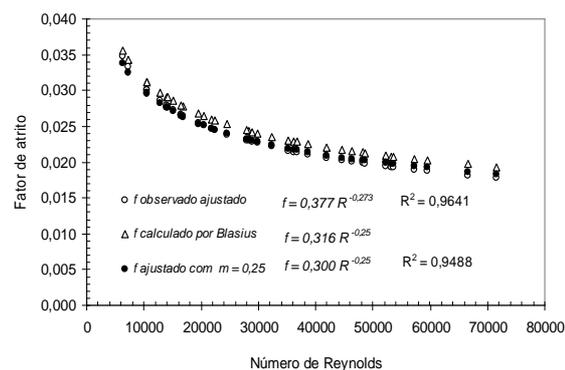


Figura 3. Fatores de atrito (f) experimentais, experimentais ajustados com $m = 0,25$ e estimados pela equação de Blasius, em função do Número de Reynolds (R).

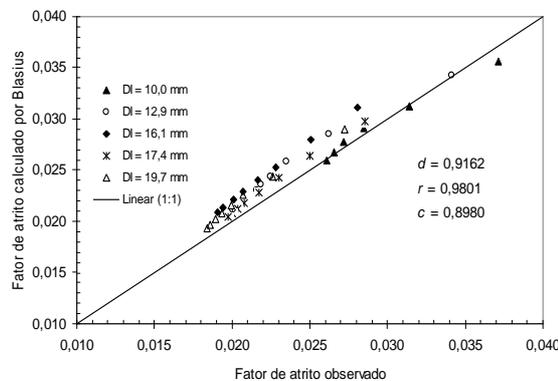


Figura 4. Fatores de atrito f observados e calculados pela equação de Blasius.

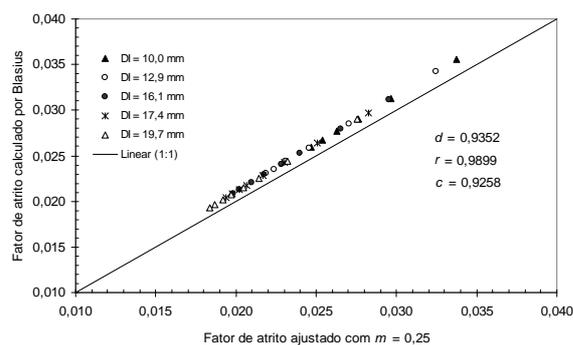


Figura 5. Fatores f ajustados com $m = 0,25$ e calculados pela equação de Blasius.

Conclusão

Para os tubos de polietileno estudados e de acordo com as condições experimentais, o fator de atrito f da equação de Darcy-Weisbach pode ser estimado com $c = 0,300$ e $m = 0,25$. A equação de Blasius superestimou o fator de atrito, porém esse fato não constitui limitação para sua utilização em projetos de irrigação. As duas equações proporcionam estimativas de f com pequeno desvio médio (5,1%).

Referências

- ALVES, P.R.V. *Análise de um coeficiente geométrico para estimativa de perdas de carga em linhas laterais de irrigação por gotejamento*. 2000. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- ANDRADE, D.V. *Avaliação hidráulica de tubos flexíveis de polietileno perfurados a laser, utilizados na irrigação*. 1990. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.
- BAGARELLO, V. *et al.* Experimental study on flow-resistance law for small-diameter plastic pipes. *J. Irrig. Drain. E. - ASCE*, New York, v. 121, n. 5, p. 313-316, 1995.
- BERNUTH, R.D. von. Discussion of "Hydraulic friction factors for pipe flow". *J. Irrig. Drain. E. - ASCE*, New York, v. 115, n. 5, p. 916-918, 1988.
- BERNUTH, R.D. von. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. *J. Irrig. Drain. E. - ASCE*, New York, v. 116, n. 2, p. 294-298, 1990.
- BERNUTH, R.D. von; WILSON, T. Friction factors for small diameter plastic pipes. *J. Hydraul. Eng. - ASCE*, New York, v. 115, n. 2, p. 183-192, 1989.

BOMBARDELLI, F.A.; GARCIA, H. Hydraulic design of large-diameter pipes. *J. Hydraul. Eng. - ASCE*, New York, v. 129, n. 11, p. 839-846, 2003.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Rev. Bras. Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

FRIZZONE, J.A. *et al.* Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, 1998.

HATHOOT, H.M. *et al.* Analysis and design of trickle-irrigation laterals. *J. Hydraul. Eng. - ASCE*, New York, v. 119, n. 5, p. 756-767, 1993.

KAMAND, F.Z. Hydraulics friction factors for pipe flow. *J. Irrig. Drain. E. - ASCE*, New York, v. 114, n. 2, p. 311-323, 1988.

McENROE, B.M. Discussion of "Hydraulic friction factors for pipe flow". *J. Irrig. Drain. E. - ASCE*, New York, v. 115, n. 5, p. 915-916, 1989.

PORTO, R.M. *Hidráulica básica*. São Carlos: EESC/USP, 1998.

ROMEO, E. *et al.* Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. *Chem. Eng. J.*, Amsterdam, v. 86, n. 3, p. 369-374, 2002.

SERGHIDES, T.K. Estimate friction factor accurately. *Chem. Eng. J.*, Amsterdam, v. 91, n. 5, p. 63-64, 1984.

SONNAD, J.R.; GOUDAR, C.T. Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-White equation. *J. Hydraul. Eng. - ASCE*, New York, v. 132, n. 8, p. 863-867, 2006.

SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K. Explicit equations for pipe-flow problems. *J. Hydraul. Division - ASCE*, New York, v. 102, n. 5, p. 657-664, 1976.

VILELA, L.A.A. *et al.* Alteração no diâmetro de tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 182-185, 2003.

YOO, D.H.; SINGH, V.P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. *J. Hydraul. Eng. - ASCE*, New York, v. 131, n. 8, p. 694-704, 2005.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Phys. Geogr.*, New York, v. 2, n. 2, p. 184-195, 1981.

Received on March 05, 2007.

Accepted on August 06, 2007.