

PERDA DE CARGA EM LINHAS LATERAIS DE MICROIRRIGAÇÃO

HEAD LOSSES ACROSS MICROIRRIGATION LATERALS

GABRIEL GRECO DE GUIMARÃES CARDOSO¹
JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE^{2*}

RESUMO

O procedimento de dimensionamento de uma linha lateral de microirrigação requer a avaliação das perdas de carga distribuídas na tubulação e das perdas de carga localizadas nas inserções dos emissores com os tubos. As perdas localizadas podem ser significativas quando comparadas com as perdas de carga totais, devido ao grande número de emissores instalados ao longo da linha lateral. Este trabalho apresenta os resultados de um experimento sobre perda de carga distribuída, fator de atrito e perda de carga localizada em conexões de emissores "on-line" em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. Foram utilizados cinco tubos com diâmetros internos de 10,0, 13,0, 16,3, 17,4 e 19,7 mm e quatro modelos de conectores, com áreas de protrusão de 19,70, 23,59, 26,50 e 31,63 mm². 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 ± 2 °C. Os resultados foram analisados e concluiu-se que o fator de atrito f da equação de Darcy-Weisbach pode ser estimado por $f = 0,300 R^{-0,25}$. A equação de Blasius com $c = 0,316$ e $m = 0,25$ superestimou o fator de atrito em 5,1%. Para desenvolver um procedimento de estimativa de K , a geometria da conexão entre o emissor e o tubo foi caracterizada por um índice de obstrução IO , que depende da razão (r) entre a área da seção transversal de escoamento, onde o conector está localizado, e a área da seção transversal de escoamento fora do conector. Uma função potência foi ajustada aos pares experimentais (IO , K). A seleção do modelo é consistente com o fenômeno físico uma vez que $K=0$ para $r=1$ (nenhuma obstrução dentro do tubo). Para $6000 < R < 72000$ a relação foi $K = 1,23 (IO)^{0,51}$. Para $6000 < R < 72000$ a relação foi $K = 1,23 (IO)^{0,51}$ com $R^2 = 0,9556$ e erro padrão do ajuste igual a 0,04245. As diferenças entre os valores de K estimados e observados são normalmente distribuídas.

Palavras-chaves: fator de perda de carga; escoamento turbulento; tubos lisos, índice de obstrução, razão de obstrução.

¹ Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (USP), Av. Pádua Dias 11, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

² Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (USP), Av. Pádua Dias 11, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência: e-mail: frizzone@esalq.usp.br.

Recebido: Mai/07

Aprovado: Ago/07

ABSTRACT

Microirrigation lateral design procedure needs to evaluate accurately both the pipe head losses and the local losses that are due to the protrusion of emitter barbs into the flow. These local losses, in fact (in relation to the high number of emitters located along the line) can become significant compared to the overall energy loss. On this paper, the results of an experimental study on the pipe head losses, friction factor and head local losses 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. Five internal diameter pipes were used: 10,0, 13,0, 16,3, 17,4 and 19,7 mm; and four connector models with a protrusion areas of 19,70, 23,59, 26,50 e 31,63 mm². According to the results analysis 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 a overestimative of f (5,1%). To derive an estimating procedure of K , the geometry of the connection between the emitter and the pipe was characterized by the obstruction index IO , which is dependent on the ratio (r) between the pipe cross-section area corresponding to the section in which the emitter is located, and the pipe cross-section area. A power relationship was then fitted to the experimental IO , K data pairs. The selection form of the relationship is consistent with the physical phenomenon since it estimates $K = 0$ for $r = 1$ (no obstruction into the pipe). For $6000 < R < 72000$ the relationship was $K = 1,23 (IO)^{0,51}$ with $R^2 = 0,9556$ and standard fitted error equal to 0,04245. The differences between K observed values and the calculated ones are normally distributed.

Keywords: friction factor; turbulent flow; smooth pipes; obstruction index, obstruction

INTRODUÇÃO

O dimensionamento de linhas laterais de microirrigação deve seguir critérios que permitam atingir alta uniformidade de distribuição de água. Para os emissores não compensados de pressão, a uniformidade de vazão ao longo da lateral depende da variação de pressão decorrente da perda de carga na tubulação, da diferença de elevação do terreno, do coeficiente de variação de fabricação do emissor, do número de emissores por planta e da temperatura da água (WU, 1997; PROVENZANO & PUMO, 2004).

Os emissores podem ser classificados de acordo com sua posição na linha lateral como "on-line", "in-line" ou integrados (JUANA et al., 2002a; PALAU-SALVADOR

et al., 2006). A introdução de emissores ao longo da linha lateral modifica o curso das linhas de fluxo, causando turbulência local que resulta em perdas de carga adicionais às perdas distribuídas no tubo. Esta turbulência deve-se à presença de uma protrusão na parede interna do tubo que causa um grau de obstrução na seção de escoamento e, nos emissores "on-line", ocorre ainda uma contração do tubo no local da inserção, diminuindo o diâmetro de escoamento (ALAMOUND, 1995; BAGARELLO et al., 1997; JUANA et al., 2002a,b; PROVENZANO & PUMO, 2004; PROVENZANO et al., 2005; PALAU-SALVADOR et al., 2006).

A perda de carga em escoamentos permanentes e uniformes de fluidos reais,

através de tubos de seção cilíndrica, pode ser calculada por diferentes equações (PORTO, 1998). A contribuição mais importante é expressa pela equação de Darcy-Weisbach (KAMAND, 1988; VON BERNUTH, 1990; BAGARELLO et al., 1995; ROMEO et al., 2002; SONNAD & GOUDAR, 2006), cuja expressão é dada pela Eq. 1:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad \text{Eq. 1}$$

em que, h_f – perda de carga distribuída na tubulação (L); L – comprimento do tubo (L); D – diâmetro interno 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 altura das asperezas (\hat{a}) nas paredes do tubo.

Na equação de Darcy-Weisbach, a estimativa do fator de atrito (f) é essencial para o cálculo da perda de carga distribuída. Para escoamento laminar ($R < 2000$), o cálculo de f é feito pela equação de Hagen-Poiseuille ($f = 64/R$), sendo apenas uma função do número de Reynolds (R), que 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 das paredes do tubo (\hat{a}/D) e do número de Reynolds (ROMEO et al., 2002).

Considerando o escoamento turbulento permanente e uniforme em tubos comerciais, a equação de Colebrook-White é a mais utilizada para calcular f (PORTO, 1998; ROMEO et al., 2002; YOO & SINGH, 2005; SONNAD & GOUDAR, 2006), sendo válida para $2000 < R < 10^8$ e $0 < e/D < 0,05$. Esta equação relaciona o fator de atrito com a

rugosidade relativa e com o número de Reynolds e também é válida para o caso limite de tubos lisos ($e = 0$) e escoamento completamente turbulento.

No escoamento turbulento uniforme em tubos lisos, o tamanho das asperezas não influi sobre a turbulência do escoamento e o coeficiente f independe da rugosidade do conduto podendo ser calculado em função do número de Reynolds. Para $4000 < R < 10^5$ o cálculo do fator de atrito pode ser feito por uma equação simples na forma proposta por Blasius (VON BERNUTH, 1990). A equação de Blasius é uma função somente do número de Reynolds sendo apresentada pela Eq. 2:

$$f = \frac{c}{R^m} \quad \text{Eq. 2}$$

Ao propor a Eq. (2) para calcular f , Blasius 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 VON BERNUTH (1990) a inserção do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach resulta em uma equação combinada com as seguintes vantagens: (i) é teoricamente perfeita e dimensionalmente homogênea, pois tanto a equação de Darcy-Weisbach quanto a de Blasius têm bases teóricas; (ii) tem bom grau de exatidão para tubos lisos quando $4000 < R < 10^5$, sendo que o número de Reynolds limite não é restritivo para sistemas de irrigação que usam tubos com diâmetros inferiores a 80 mm; (iii) pode ser facilmente corrigida para variações na viscosidade da água.

Alternativas empíricas para determinar f , por ensaios de laboratório, satisfazem à expectativa de se obter resultados aceitáveis, como se observa nos trabalhos de VON BERNUTH (1990) e HATHOOT et al. (1993) que apresentam bons resultados

usando equações do tipo potência, semelhante à de Blasius. BAGARELLO et al. (1995) mostraram que os coeficientes propostos por Blasius superestimam os valores de f para os atuais tubos de polietileno. Estes autores analisaram tubos de polietileno de diâmetros nominais de 16, 20 e 25 mm, variando 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 $m = 0,25$. A perda de carga localizada (hf_L) na inserção de um emissor na linha lateral deve-se à resistência a movimentação da corrente fluída oferecida pela protrusão da conexão no interior do tubo, sendo expressa na forma clássica como uma fração K da carga cinética, (JUANA et al., 2002a) obtida pelo princípio da similaridade de Reynolds (Eq. 3):

$$hf_L = K \frac{V_o^2}{2g} \quad \text{Eq. 3}$$

em que, hf_L – perda de carga localizada (L), V_o - velocidade média de aproximação da corrente fluída (L T⁻¹), K – coeficiente de carga cinética ou de resistência de perfil, g – aceleração da gravidade (L T⁻²).

Aumentando-se a velocidade de escoamento, maiores serão as perdas localizadas, uma vez que a turbulência do fluido na passagem entre o elemento obstrutor e a parede do tubo tende a aumentar.

Pesquisas têm sido desenvolvidas para analisar o escoamento em linhas laterais de microirrigação (WU & GITLIN, 1975; VON BERNUTH, 1990; WU, 1992; KANG et al., 1996; ZAYANI et al., 2001). O reconhecimento da importância das perdas de carga localizadas em conexão de emissores tem estimulado o desenvolvimento de modelos matemáticos para estimá-las. O coeficiente de carga cinética K depende do tamanho e da forma

da protrusão do conector e, devido à variabilidade morfológica (forma e tamanho) de fabricação, os conectores de emissores comerciais requerem investigação experimental particular. Pela dificuldade de sintetizar a complexidade do escoamento através de um elemento obstrutor na tubulação, tem-se proposto o desenvolvimento de relações empíricas para expressar K em função do grau de obstrução causado por protrusões naseção de escoamento (BAGARELLO et al. 1997; ALVES & PORTO, 2002; JUANA, et al., 2002a,b; PROVENZANO & PUMO, 2004; PROVENZANO et al. 2005; PALAU-SALVADOR et al., 2006).

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estimar o fator de atrito f em tubos de polietileno utilizados em linhas laterais de microirrigação e propor um modelo para estimativa da perda de carga localizada na protrusão de emissores conectados “on-line”.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no laboratório de irrigação do Departamento de Engenharia Rural – ESALQ/USP. Foram utilizados tubos de polietileno de baixa densidade, com diâmetros internos de 10,0 mm; 13,0 mm; 16,3 mm; 17,4 mm e 19,7 mm, com 15 m de comprimento entre os pontos de medição de pressão utilizando-se quatro tipos de conectores. Os diâmetros internos dos tubos e as dimensões dos conectores “on-line” foram medidos em projetor ótico, modelo HB400-2 - Starret Precision Optical. A espessura média da parede de cada um dos tubos foi determinada a partir de 10 anéis seccionados perpendicularmente ao eixo longitudinal da tubulação e a mensuração foi feita no projetor ótico. Na Tabela 1 são apresentadas as principais características

dos tubos analisados e a faixa de número de Reynolds em que se desenvolveu o experimento.

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

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	0,8	10,0	levemente elíptica	Lisa e polida	6000 - 22000
15	40	Plasnova	1,2	13,0	elíptica	Lisa e polida	7000 - 36000
18	20	Plasnova	0,8	16,3	levemente elíptica	Lisa e polida	10000 - 53000
20	40	Plasnova	1,3	17,4	circular	Lisa e polida	12000 - 58000
22	40	Plasnova	1,5	19,7	circular	Lisa e polida	14000 - 72000

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

Para se caracterizar a geometria dos conectores foram realizadas medidas das dimensões das conexões como se apresenta na Figura 1. Na Tabela 2 são apresentadas as características geométricas dos conectores ensaiados.

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 - CONAUT. Esse aparelho apresenta capacidade de leitura de $2,78 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (1L h⁻¹) e precisão de 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.

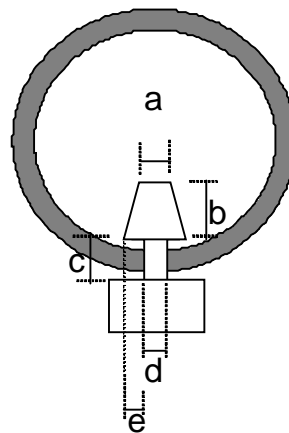


Figura 1. Caracterização das dimensões de um conector

Tabela 2. Características geométricas dos conectores

Tipo - Modelo / Fabricante ¹ Dimensões	C ₁ - Spray Microjet / Plasnova	C ₂ - Conector para Microtubo / Amanco	C ₃ - Click Tif-PC/ NaanDan	C ₄ -Katif / Plastro
a (mm)	3,93	3,37	3,01	2,140
b (mm)	3,19	5,070	6,13	5,19
c (mm)	3,25	4,95	3,50	2,64
d (mm)	4,36	4,42	4,99	6,51
e (mm)	1,63	1,53	1,13	0,96
Área transversal (mm ²)	19,70	23,59	26,50	31,63

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

A medição da pressão diferencial foi realizada 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 e a temperatura média foi de 20°C. As leituras de pressão diferencial foram feitas após a estabilização da coluna de mercúrio do manômetro diferencial, o que se dava dentro de um intervalo de tempo de aproximadamente 4 minutos. Os ensaios foram realizados com vazão sempre crescente. Os pares de valores vazão-diferença de pressão foram obtidos em três

segmentos de tubos de cada diâmetro, utilizando-se para a análise os valores médios.

Para 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. Os emissores foram instalados em espaçamento de 0,5 m, sendo que nos 15 m de tubo foram instalados 29 emissores. As perdas de carga observadas nas tubulações com e sem emissores instalados, foram analisadas em função das vazões, utilizando-se um modelo tipo potência, Eq. 4:

$$J = \beta Q^n \quad \text{Eq.4}$$

em que, J - perda de carga unitária (m m⁻¹), Q - vazão em m³ s⁻¹, e n - constantes. Para facilitar a comparação com a equação de Darcy-Weisbach, com f calculado pela equação de Blasius, foram ajustadas equações com $n = 1,75$.

Para a determinação do fator de atrito f foi utilizada a equação de Darcy-Weisbach, 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 Eq. 2. Para a comparação dos valores experimentais de f 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 perda de carga localizada na inserção dos conectores com a tubulação (hf_L) foi determinada experimentalmente de acordo com a proposta de AL-AMOUD (1995): mediu-se a perda de carga unitária na tubulação de diâmetro interno D sem conectores (J , $m\ m^{-1}$) e, em seguida, a perda de carga unitária na linha com 29 emissores

vedados (J' , $m\ m^{-1}$). As diferenças entre esses valores de perdas de carga foram multiplicadas pelo comprimento da tubulação (L) e divididas pelo número de emissores (N) conectados a ela. O resultado foi a perda de carga localizada provocada por um emissor (hf_L , mca). Esse processo é representado pela Eq. 5:

$$hf_L = \frac{J' - J}{N} L \quad \text{Eq. 5}$$

Os valores de hf_L foram relacionados aos valores de $V^2/2g$, obtendo-se o coeficiente de carga cinética K da Eq. (3). Para cada combinação tubo-conector foi determinado um valor médio de K , por análise de regressão linear.

O coeficiente K depende das características geométricas da inserção do emissor, do coeficiente de contração do fluxo ao atravessar o elemento obstrutor e do número de Reynolds, R . Para uma dada área da seção transversal do tubo, vazão transportada e conexão com dimensões definidas, o valor de K reduz-se com o aumento de R até certo limite, mantendo-se aproximadamente constante para $R > 10000$ (BAGARELLO et al., 1997; PROVENZANO & PUMO, 2004).

Na prática, o efeito das forças viscosas pode ser negligenciado a partir de certo valor de R (JUANA et al. 2002b), e uma análise simplificada permite relacionar K apenas com a geometria do elemento obstrutor, uma vez que se observa aumento de seu valor com o aumento da seção transversal obstruída (BAGARELLO et al. 1997; PROVENZANO & PUMO, 2004; PALAU-SALVADOR et al., 2006).

As perdas de carga localizadas nos conectores dos emissores “on-line” podem ser analisadas à semelhança das análises de perdas de carga localizada em alargamento brusco de tubulações (MORRIS & WIGGERT, 1972), pois ocorre contração e subsequente ampliação do trajeto do fluido após a conexão, com turbulência local e conseqüente transformação de energia. Na Figura 2 esquematiza-se o modelo de contração após a seção de restrição A_c ($A_c = r A_o = r A$), sendo r a razão de obstrução.

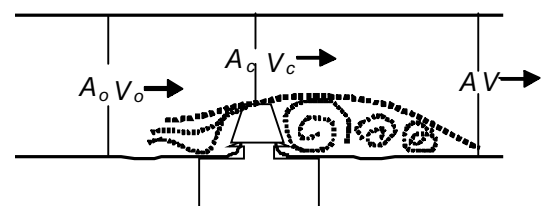


Figura 2. Esquema do escoamento através de um tubo contendo um emissor “on-line”.

Desconsiderando-se a ação das forças viscosas e o efeito da contração das linhas de fluxo na passagem pelo conector, pode-se realizar uma análise teórica simplificada aplicando-se os teoremas da conservação da energia e da massa entre as seções A_c e A (Figura 2) chegando-se à equação de Bélanger (Eq. 6):

$$hf_L = \frac{(V_c - V)^2}{2g} = \left(\frac{A}{A_c} - 1 \right)^2 \frac{V^2}{2g} \quad \text{Eq. 6}$$

Comparando-se as Eqs. 3 e 6 verifica-se que são correspondentes, pois, as velocidades V_o e V são iguais. Na Eq. 6 o coeficiente de carga cinética é expresso puramente por um fator geométrico que não integra todos os fatores envolvidos no escoamento. Considerando-se a complexidade para sintetizar teoricamente todos os fenômenos envolvidos no escoamento através do elemento obstrutor, ajustou-se uma relação empírica para K em função do índice de obstrução (IO) definido pela Eq. 7:

$$IO = \left(\frac{A}{A_c} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1-r}{r} \right)^2 \quad \text{Eq. 7}$$

em que, r é a razão de obstrução ($r = A_c/A$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 para Alves (2000) foi 0,2657. O valor de c foi 0,377 contra 0,3443 obtido por ALVES (2000). Fixando-se $m = 0,25$, determinou-se o valor de c igual a 0,300 (Figura 3), enquanto VON BERNUTH & 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.

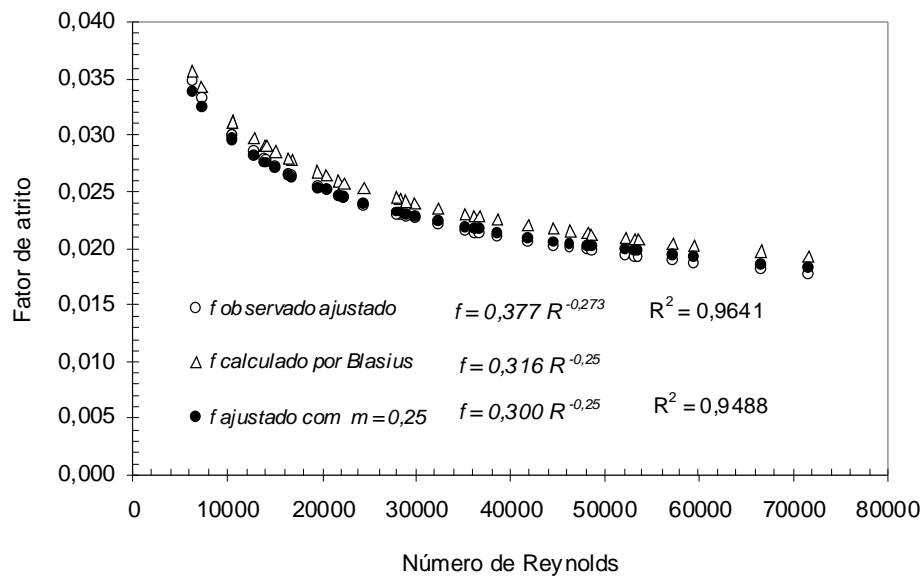


Figura 3. Curvas de fator de atrito (f) em função do Número de Reynolds (R), utilizando-se m livre, $m = 0,25$ e equação de Blasius.

Na Figura 4 mostra-se a concordância entre os valores de f calculados pela equação de Blasius e os valores experimentais ajustados com $m = 0,25$. Os valores ajustados estão distribuídos acima da reta 1:1 indicando que a equação de Blasius superestimou os valores de f , em média 5,1% neste estudo. Considerando os valores observados em laboratório, verificou-se que a maior diferença percentual entre os valores de f observados e os valores f de Blasius foi de 10,26% e a menor foi 0,20%, sendo em média 5,6%, e que 42% das diferenças foram inferiores a 5%. O índice de concordância de Willmoth d (WILLMOTH, 1981), o índice de correlação de Pearson r (MONTGOMERY & RUNGER, 2003) e o índice de confiança de Camargo IC (CAMARGO & SENTELHAS, 1997) indicaram concordância

estrita entre os valores de f ajustados com $m=0,25$ e o modelo de Blasius.

A partir desses resultados pode-se indicar como alternativa para o cálculo do fator de atrito nos tubos de polietileno a equação: $f = 0,300 R^{-0,25}$, concordando com os estudos experimentais e semi-teóricos conduzidos por BAGARELLO et al. (1995) que propuseram $c = 0,302$. Dessa forma, a equação de Darcy-Weisbach (Eq. 1) pode ser reescrita de forma a representar J ($m m^{-1}$) em função da vazão Q ($m^3 s^{-1}$) e do diâmetro do tubo D (m), conforme Eq. 8. Comparando-se a constante da Eq. 8 com a constante da equação de Darcy-Wiesbach ($2,4580 \times 10^{-2}$) utilizando f de Blasius, constata-se que a Eq. 8 fornece valores de perda de carga 5,10% menores.

$$J = 2,3336.10^{-2} v^{0,25} Q^{1,75} D^{-4,75} \quad \text{Eq.8}$$

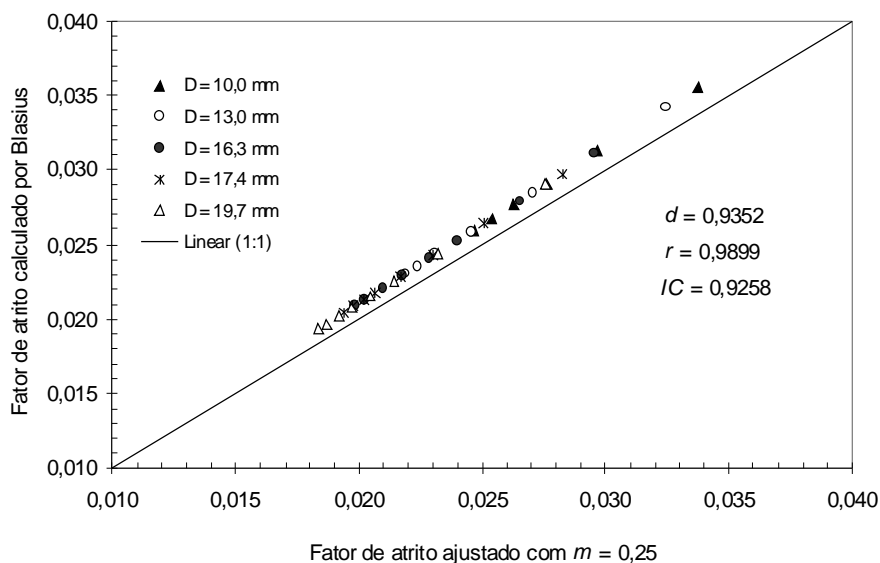


Figura 4. Concordância entre os valores de f ajustados com $m = 0,25$ e os valores calculados pela equação de Blasius.

Perda de carga nos tubos com emissores vedados

Na Tabela 3 estão apresentados os coeficientes das equações de perda de carga unitária, determinados para os cinco diâmetros selecionados, combinados com os quatro modelos de conectores instalados nos tubos. Verifica-se que em todos os diâmetros o conector C4, com maior área de protrusão ($31,63 \text{ mm}^2$), provocou maior perda de carga, sendo a seguinte ordem geral: $C4 > C3 > C2 > C1$. Essa ordenação está de acordo com as áreas dos conectores, confirmando que quanto maior a geometria de encaixe do emissor, maior é a perda de carga provocada pelo mesmo. As equações de perdas de carga observadas, cujos coeficientes \hat{a} são apresentados na Tabela 3, foram ajustadas para um expoente $n = 1,75$, vazão expressa em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ e perda de carga unitária em m m^{-1} . O acréscimo de perda de carga provocada pela conexão dos emissores,

para todas as combinações conector-tubo foi calculado para a velocidade de escoamento de $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Observa-se que para todos os diâmetros, os maiores acréscimos (35,89% a 61,53%) ocorreram para o conector C4, que possui maior área de protrusão ($31,63 \text{ mm}^2$). Os menores acréscimos (10,51% a 25,13%) ocorreram com o C1, de menor área de protrusão ($19,70 \text{ mm}^2$).

AL-AMOUND (1995) realizou um estudo utilizando oito tipos de emissores "on-line" inseridos com espaçamento de 1 m em cinco tubos de polietileno com diâmetros diferentes. Os resultados indicaram significativos acréscimos de perda de carga em função das áreas de protrusão das conexões. Acréscimo de perda de carga superior a 32% foi verificado para o tubo de 13,0 mm de diâmetro com emissor cuja área de protrusão da conexão foi de $27,00 \text{ mm}^2$ e, para uma área de protrusão de $33,30 \text{ mm}^2$, o acréscimo foi superior a 47%.

Coeficientes da equação de perda de carga unitária nos tubos de polietileno com conectores instalados (J' , em $m\ m^{-1}$) em função da vazão (Q em $m^3\ s^{-1}$), para $n = 1,75$ e acréscimo de perda de carga em relação ao tubo sem conectores.

Diâmetros internos (mm)	Conectores	Área de protrusão (mm ²)	Parâmetro β da eq. $J' = \beta Q^{1,75}$	R^2	Acréscimo de perda de carga (%)
$D_1 = 10,0$	C_1	19,70	2925926,92	0,9997	25,13
	C_2	23,59	3219434,73	0,9998	37,58
	C_3	26,50	3479912,31	0,9996	48,77
	C_4	31,63	3777489,18	0,9985	61,53
$D_2 = 13,0$	C_1	19,70	778260,49	0,9994	15,32
	C_2	23,59	874964,63	0,9976	29,61
	C_3	26,50	903177,92	0,9977	33,82
	C_4	31,63	1010585,02	0,9972	49,74
$D_3 = 16,3$	C_1	19,70	258896,14	0,9997	11,71
	C_2	23,59	280262,73	0,9994	20,92
	C_3	26,50	294403,78	0,9999	27,03
	C_4	31,63	338598,04	0,9988	46,08
$D_4 = 17,4$	C_1	19,70	190106,43	0,9996	11,54
	C_2	23,59	205342,73	0,9991	20,41
	C_3	26,50	212415,47	0,9993	24,58
	C_4	31,63	235126,52	0,9993	37,88
$D_5 = 19,7$	C_1	19,70	104464,09	0,9994	10,51
	C_2	23,59	112235,92	0,9990	18,73
	C_3	26,50	115890,14	0,9991	22,62
	C_4	31,63	128464,73	0,9991	35,89

Verifica-se, portanto, que a perda de carga localizada na protrusão dos conectores cresce em função do aumento do grau

de obstrução que o conector causa na tubulação HOWELL E BARINAS (1980). Também analisaram as perdas de carga

localizadas em conexões de emissores sobre um tubo de 13,0 mm de diâmetro e sugeriram uma equação para estimar a perda de carga localizada em termos de comprimento equivalente, entretanto seus estudos foram baseados apenas em um diâmetro de 13,0 mm.

Perda de carga localizada

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos coeficientes de carga cinética (K) para cálculo da perda de carga localizada (hf_L) em função de $V^2/2g$ para os quatro modelos de conectores instalados nos cinco diâmetros de tubos estudados. Observa-se que a perda de carga localizada diminuiu com o aumento do diâmetro do tubo, em todos os modelos de conectores. Pode-se também constatar que, para um mesmo diâmetro de tubo, as perdas de carga localizadas aumentam de acordo com a seguinte seqüência de conexão: $C_4 > C_3 > C_2 > C_1$, o que corresponde ao aumento da perda de carga localizada em função do aumento da área da seção transversal do conector.

Para desenvolver um procedimento de estimativa de K , a geometria da conexão entre o emissor e o tubo foi caracterizada pelo índice de obstrução IO , que depende da razão entre a área da seção transversal do tubo, onde o conector está localizado, e a área da seção transversal do tubo fora do conector. Uma função potência foi a que melhor se ajustou aos pares experimentais (IO, K). Na Figura 5 apresenta-se a relação entre K e IO para vinte pares de pontos que representam as combinações tubo-conector e para $5000 < R < 68000$: $K = 1,23 (IO)^{0,51}$, com $R^2 = 0,9556$. A seleção do modelo foi consistente com o fenômeno físico uma vez que $K = 0$ para $r = 1$ (nenhuma obstrução). O coeficiente de determinação $R^2 = 0,9556$, significativo ao nível de 5% de probabilidade,

mostra boa relação entre K e IO . O erro padrão do ajuste foi 0,04245 e as diferenças entre os valores de IO estimados e observados são normalmente distribuídos. Observa-se na Figura 5 as duas curvas que delimitam o intervalo de predição com 95% de confiança e que todos os pares de pontos experimentais estão contidos nesse intervalo. Também se verifica que os pares (IO, K) adaptados dos trabalhos de ALVES & PORTO (2002) e BAGARELLO et al. (1997) estão contidos nesse intervalo.

Em consequência dos resultados, propõe-se que a perda de carga localizada na protrusão do emissor possa ser determinada pela expressão: $Hf_L = 1,23 (IO)^{0,51} V^2/2g$, para $5000 < R < 68000$, sendo Hf_L expressa em m.c.a. e V em $m s^{-1}$.

Tabela 4. Coeficientes de carga cinética (K) da equação geral de perda de carga localizada para quatro modelos de conexões sobre cinco diâmetros de tubos de polietileno.

Diâmetro interno (mm)	Conector	Coeficiente K da eq. $Hf_L = K V^2/2g$	R^2
$D_1 = 10,0$	C ₁	0,3306	0,9913
	C ₂	0,4971	0,9918
	C ₃	0,6458	0,9920
	C ₄	0,8154	0,9912
$D_2 = 13,0$	C ₁	0,1378	0,9942
	C ₂	0,2671	0,9942
	C ₃	0,3045	0,9940
	C ₄	0,4495	0,9933
$D_3 = 16,3$	C ₁	0,0783	0,9926
	C ₂	0,1398	0,9927
	C ₃	0,1806	0,9923
	C ₄	0,3079	0,9923
$D_4 = 17,4$	C ₁	0,0695	0,9933
	C ₂	0,1236	0,9935
	C ₃	0,1488	0,9933
	C ₄	0,2291	0,9937
$D_5 = 19,7$	C ₁	0,0533	0,9926
	C ₂	0,0951	0,9925
	C ₃	0,1148	0,9928
	C ₄	0,1823	0,9925

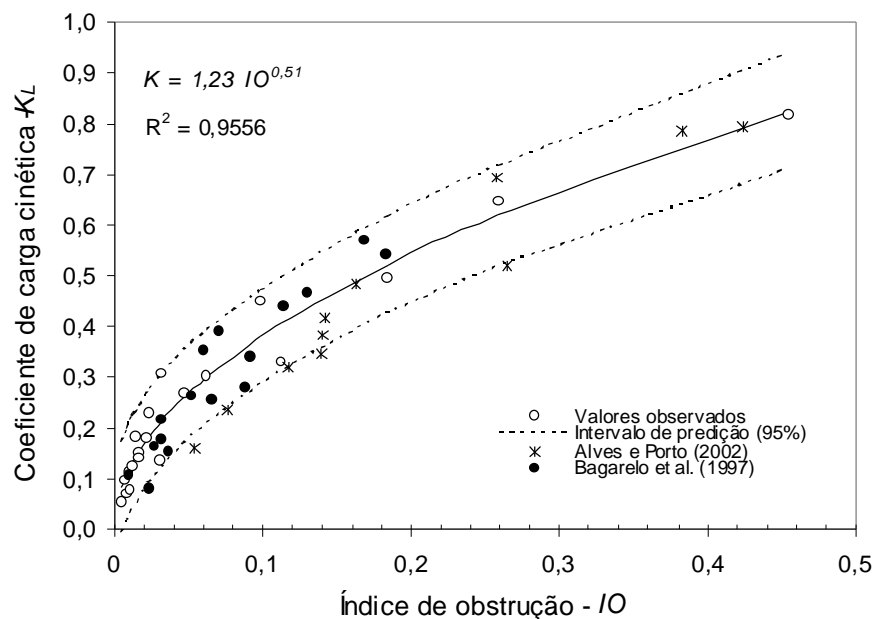


FIGURA 5. Coeficiente de carga cinética em função do índice de obstrução, limite de predição com 95% de confiança e comparação com os valores relatados por ALVES & PORTO (2002) e BAGARELLO et al. (1997).

CONCLUSÕES

Nas condições em que foi realizado este experimento, conclui-se que:

1. Para os tubos de polietileno utilizados em linhas laterais de microirrigação o fator de atrito f da equação de Darcy-Weisbach pode ser estimado com $c = 0,300$ e $m = 0,25$.

2. As maiores perdas de carga localizadas resultam da combinação de tubulações de menores diâmetros com conectores de maior área de protrusão, indicando que as perdas de carga localizadas em conectores de emissores para microirrigação estão relacionadas ao grau de obstrução à passagem do fluido.

3. Pode-se prever a perda de carga localizada na conexão dos emissores com a linha lateral de sistemas de microirrigação

conhecendo-se a geometria da protrusão do conector.

4. A equação $K = 1,23 IO^{0,51}$ pode ser utilizada para a prever o valor do coeficiente K da equação geral de perda de carga localizada.

REFERÊNCIAS

- AL-AMOUND, A. I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. *Journal of Agriculture Engineering Research.*, Silsoe, UK, v.60, n.1, p.1-5, 1995.
- ALVES, P.R.V. *Análise de um coeficiente geométrico para estimativa de perdas de carga em linhas laterais de irrigação por gotejamento*. São Carlos, 2000. 163p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ALVES, P.R.V.; PORTO, R. Coeficiente geométrico para estimativa da perda de carga localizada em linhas laterais de irrigação por gotejamento. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, SP, v.22, n.1, p.51-59, 2002.
- 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*, New York, v.121, n.5, p.313-316, 1995.
- BAGARELLO, V., FERRO, V., PROVENZANO, G., PUMO, D. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.123, n.1, p.1-7, 1997.
- 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, RS, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- HATHOOT, H.M.; AL-AMOUND, A.I.; MOHAMMAD, F.S. Analysis and design of trickle-irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.119, n.5, p.756-767, 1993.
- HOWELL, T.A.; BARINAS, F.A. Pressure loss across trickle irrigation fitting and emitters. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, MI, v.23, n.4, p.67-72, 1980.
- JUANA, L., RODRIGUES-SINOBAS, L.; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.128, n.6, p.376-384, 2002a.
- JUANA, L., RODRIGUES-SINOBAS, L.; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. II: Experimental study and validation." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.128, n.6, p.385-396, 2002b.
- KAMAND, F.Z. Hydraulic friction factor for pipe flow. *Journal of Irrigation and Drainage* KANG, Y.; NISHIYAMA, S.; CHEN, H. Design of microirrigation lateral on nonuniform slopes, *Irrigation Science*, Sidney, MT, , v.17, n.1, p.3-14, 1996.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenharia*. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 463p. 1999.
- MORRIS, H.M.; WIGGERT, J.M. *Applied hydraulics in engineering*. 2. ed. New York: John Wiley, 1972. 629p.
- PALAU-SALVADOR, G.; SANCHIS, L.H.; GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; ARVIZA-VALVERDE, J. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.132, n.6, p.522-530, 2006.

- PORTO, R.M. *Hidráulica básica*. São Carlos: EESC/USP, 1998. 540p.
- 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.
- PROVENZANO, G.; PUMO, D.; DI DIO, P. Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation lateral. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.131, n.6, p.525-532, 2005.
- ROMEO, E., ROYO, C., MONZÓN, A. Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. *Chemical Engineering Journal*, Amsterdam, v.8, n.3, p.369-374, 2002.
- SERGHIDES, T. K. Estimate friction factor accurate. *Chemical Engineering Journal*, 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. *Journal of Hydraulics Engineering*, New York, v.132, n.8, p.863-867, 2006.
- SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K. Explicit equations for pipe-flow problems. *Journal of Hydraulics Division*, New York, v.102, n.5, p.657-664, 1976.
- VILELA, L.A.A.; SOCCOL, O.J.; GERVÁZIO, E.S.;FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. Alteração no diâmetro de tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.7, n.1, p.182-185, 2003.
- VON BERNUTH, R.D.; WILSON, T. Friction factors for small diameter plastic pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.115, n.2, p.183-192, 1989.
- VON BERNUTH, R. D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.116, n.2, p.294-298, 1990.
- YOO, D.H.; SINGH, V.P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. *Journal of Hydraulics Engineering*, New York, v.131, n.8, p.694-704, 2005.
- WU, I.P. Energy gradient line for direct hydraulic calculation in drip irrigation design. *Irrigation Science*, Amsterdam, v.13, n.1, p.21-29, 1992.
- WU, I. P., GITLIN, H. M. Energy gradient line for drip irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, New York, v.101, n.4, p.323-326, 1975.
- WU, I.P. An assessment of hydraulics design of micro-irrigation systems. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.32, n.3, p.275-284, 1997.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. *Physical Geography*, Canada, v.2, n.2, p.184-195, 1981.
- ZAYANI, K.; ALOUINI, A.; LEBDI, F.; LAMADDALENA, N. Design of drip irrigation systems using the energy drop ratio approach. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, MI, v.44, n.5, p.1127-1133, 2001