Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Perda localizada de carga em conectores utilizados em microirrigação

Danieli Bariviera Zitterell

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba 2011 Danieli Bariviera Zitterell Engenheiro Agrônomo

Perda localizada de carga em conectores utilizados em microirrigação

Orientador: Prof. Dr. JOSE ANTONIO FRIZZONE

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba 2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Zitterell, Danieli Bariviera Perda localizada de carga em conectores utilizados em microirrigação / Danieli Bariviera Zitterell. - - Piracicaba, 2011. 65 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011. Bibliografia.

1. Irrigação localizada 2. Perda de carga 3. Microtubos I. Título

CDD 631.7 Z82p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Ao meu querido pai, Carlos, pelo exemplo deixado e boas recordações.

(Dedico)

À minha mãe Zelinda e ao meu irmão Eduardo por compartilharem meus sonhos e ajudarem a realizá-los.

(Ofereço)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas oportunidades e pessoas maravilhosas que colocou na minha vida.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" pela acolhida e ao curso de pósgraduação em Irrigação e Drenagem pela oportunidade concedida para realização deste trabalho.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

Ao Prof. Dr. Jose Antonio Frizzone, meu sincero agradecimento pela orientação, dedicação e pelos momentos proporcionados, que foram fundamentais para a minha formação pessoal e profissional.

Aos professores Mario Nestor Ullmann e Olívio José Soccol pelas oportunidades, ensinamentos e pela importante contribuição no direcionamento da minha vida acadêmica e profissional.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP pelo conhecimento, atenção e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas da pós-graduação que tão bem me acolheram, obrigada pelos momentos de descontração e pela disposição em ajudar e contribuir.

Aos meus familiares, amigos e todas as pessoas com quem dividi momentos e que colaboraram para a realização deste trabalho, minha gratidão.

"Seja a mudança que você deseja ver no mundo".

(Mahatma Gandhi)

SUMÁRIO

RES	SUMO	11
ABS	STRACT	13
LIS	TA DE FIGURAS	15
LIS	TA DE TABELAS	17
1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1.	Perda de carga	21
2.2.	Análise dimensional	21
2.3.	Equações de perda de carga	22
2.4.	Equações de perda de carga contínua	24
2.5.	Perda localizada de carga	27
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1	Instalações	31
3.2	Determinação da perda de carga distribuída	33
3.3	Determinação da perda localizada de carga	35
3.4	Aplicação da Análise Dimensional – Teorema de Buckingham	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Perda de carga contínua no tubo	43
4.2	Perda localizada de carga nos conectores	43
4.3	Aplicação da Análise Dimensional – Teorema de Buckingham	49
4.4	Aplicação	56
5	CONCLUSÕES	61
REF	ĒRÊNCIAS	63

RESUMO

Perda localizada de carga em conectores utilizados em microirrigação

As perdas localizadas de carga são elementos frequentemente negligenciados em dimensionamento de sistemas de irrigação, afetando a uniformidade de aplicação de água. Algumas peças acessórias não possuem equações que estimem estas perdas de forma simples e eficiente. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de ajustar uma equação que estime a perda localizada de carga na passagem lateral em conectores. Foram testados 11 modelos de conectores em 12 diferentes diâmetros de tubos formando 15 conjuntos de tubo/conector. Os conectores foram caracterizados quanto aos diâmetros internos e dimensões. A perda localizada de carga foi obtida por diferença entre perda de carga distribuída no tubo mais conector e perda de carga no tubo. Os parâmetros responsáveis pela perda localizada de carga foram organizados em termos adimensionais utilizando o teorema de Buckingham. Um modelo matemático foi desenvolvido e apresentou um coeficiente de determinação de 93,31%. Elementos como diâmetro interno do conector e do tubo, comprimento do conector, velocidade de escoamento da água, número de Reynolds e número de Froude influenciaram na perda localizada de carga nos conectores. O modelo foi comparado com os dados observados e apresentou um desempenho classificado como ótimo, podendo ser empregado no cálculo da perda localizada de carga na passagem lateral em conectores.

Palavras-chave: Perda localizada de carga; Conectores; Teorema de Buckingham

ABSTRACT

Local head losses in the connectors used in microirrigation

Local losses are often neglected in design of irrigation systems affecting the uniformity of water application. Some accessories have no simple and efficient equations to estimate these losses. The main objective of this work was to develop an equation to estimate the local head loss in the lateral passage connectors. 11 models of connectors in 12 different diameters of pipes were tested forming 15 groups of pipe/connector. The connectors were characterized by its internal diameters and dimensions. The local head loss was determined by subtracting the head loss on the connector and pipe from the head loss on the pipe. The parameters affecting the local head loss were defined as dimensionless terms using Buckingham's theorem. A mathematical model was developed and presented a determination coefficient of 93.31%. Elements such as inner diameter of the connector and pipe length, connector, water flow velocity, Reynolds number and Froude number influenced the local head loss in the connectors. The model was compared with the observed data and presented a performance classified as excellent and can be used in calculating of the local head loss in the lateral passage connectors.

Keywords: Local head losses; Connectors; Buckingham's theorem

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Croqui da bancada de ensaio de perda de carga31
Figura 2 - Diâmetro dos tubos no projetor ótico de perfil
Figura 3 - Medidores magnéticos indutivos
Figura 4 - Segmento de PVC instalado para medição de perda de carga distribuída no tubo34
Figura 5 - Medidas das dimensões dos conectores no projetor ótico de perfil35
Figura 6 - Representação esquemática das dimensões dos conectores utilizados nos ensaios36
Figura 7 - Tubo, conector e manômetro inseridos na linha lateral de polietileno
Figura 8 - Perda de carga (m) em 20 metros de tubulação em função da vazão (m ³ s ⁻¹) para o tubo
e tubo mais conector46
Figura 9 - Perda localizada de carga (m) para os conectores inseridos em diferentes tubos, em
função da vazão (m ³ s ⁻¹)49
Figura 10 - Comparação entre dados de perda localizada de carga calculados pelo modelo
proposto, observados experimentalmente e calculados pela equação de Zitterell et al.
(2009)
Figura 11 - Comparação entre dados de perda localizada de carga observada e calculada pelo
modelo para conectores
Figura 12 - Variação de vazão e pressão nos emissores localizados nos extremos de uma linha
lateral de 104 m de comprimento, em função da perda de carga no microtubo mais
conector

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos tubos utilizados no ensaio
Tabela 2 - Principais características dos conectores utilizados nos ensaios
Tabela 3 - Combinações de tubo-conector
Tabela 4 - Variáveis que afetam a perda localizada de carga em conectores
Tabela 5 - Grupos adimensionais para predição da perda localizada de carga em conectores40
Tabela 6 - Classificação do índice de confiança ou desempenho (C) de Camargo e Sentelhas
(1997)
Tabela 7 - Equações de perda de carga contínua (m) em 20 m de tubo em função da vazão
$(m^3 s^{-1})$ 43
Tabela 8 - Equações de perda de carga (m) em 20 m de tubo com conector em função da vazão
$(m^3 s^{-1})$
Tabela 9 - Equações de perda localizada de carga (m) para os conectores inseridos em diferentes
tubos, em função da vazão (m ³ s ⁻¹)48
Tabela 10 - Resultados da análise de regressão múltipla para perda localizada de carga em
conectores
Tabela 11 - Coeficiente de correlação de Pearson – r , coeficiente de Willmott - d e índice de
confiança de Camargo e Sentelhas - C calculados para cada conjunto de
tubo/conector e total geral

1 INTRODUÇÃO

Um dos fatores que determina o sucesso de um sistema de irrigação é a uniformidade de aplicação de água. Baixos valores de uniformidade resultam em maior consumo de água e energia, perda de nutrientes e déficit hídrico em algumas plantas. Para garantir a uniformidade, é indispensável um dimensionamento hidráulico adequado, exigindo que características hidráulicas dos seus componentes sejam conhecidas. A contabilização das perdas de carga totais em tubulações e conexões permite um dimensionamento hidráulico mais exato do sistema, especialmente em sistemas de irrigação localizada, que contam com um elevado número de peças acessórias.

Conectores são componentes indispensáveis em sistemas de irrigação localizada. Em gotejamento fazem a transposição da água da linha de derivação para os tubos gotejadores. Em microaspersão permitem a conexão entre a linha lateral e o microtubo, sendo este último o responsável pela condução da água até o microaspersor.

A perda de carga em conectores pode ocorrer de duas formas: Na passagem direta ou na passagem lateral. No primeiro caso, a água escoa apenas em uma direção e a perda ocorre devido à obstrução da seção do tubo decorrente da protrusão do conector na linha. A passagem lateral ocorre quando a água é derivada de uma linha primária para uma secundária. Devido à mudança de direção do fluxo da água e da ocupação pelo conector de uma área da seção interna do tubo, ocorre modificação das condições do escoamento e turbulência.

A perda de carga na passagem direta pode ser estimada por equações propostas na literatura para gotejadores do tipo on-line, que levam em consideração o índice de obstrução. Já as perdas na passagem lateral foram estudadas por Zitterell et al. (2009), que verificou a sua importância na uniformidade aplicação de água em sistemas de microaspersão. Contudo, conectores são utilizados também em sistemas com maiores vazões, sugerindo maiores perdas de carga. Somado a isso, os modelos de conectores existentes no mercado são de formatos e dimensões variados, o que limita a aplicação das equações propostas na determinação da perda de carga. Desta forma, um estudo mais aprofundado das variáveis que afetam a perda localizada de carga em conectores é necessário para melhor entender o fenômeno.

O presente trabalho tem como objetivo identificar os elementos envolvidos na perda localizada de carga em conectores e ajustar equações que a estimam utilizando o teorema de Buckingham.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perda de carga

Perda de carga é um termo utilizado para caracterizar a dissipação de energia por unidade de peso de um fluido quando este escoa (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2006). Em sistemas de irrigação, a energia da água é dissipada ao longo das tubulações transformando-se em calor. De acordo com Azevedo Netto et al. (1998), a perda de carga imprime uma resistência ao escoamento e deve-se principalmente à viscosidade do fluido e à inércia das partículas. É variável de acordo com o tamanho das rugosidades da parede do tubo e com a velocidade da água. Estes fatores provocam vários graus de perda de carga, distinguindo-se o fluxo em regimes.

Para melhor entender os fenômenos de escoamento, é necessário um estudo baseado em conhecimentos teóricos para que se possa estabelecer leis e equações que relacionem variáveis entre si e representem o fenômeno. Em mecânica dos fluidos, muitos problemas são insolúveis apenas pelo método teórico. De acordo com Schiozer (1996), o tratamento teórico de um fenômeno traz duas questões: i) a impossibilidade total da análise ou ii) a possibilidade com resultados próximos da realidade. Um procedimento utilizado para melhor extrair conclusões é combinar métodos teóricos com dados experimentais no desenvolvimento de soluções práticas em problemas hidráulicos.

2.2 Análise dimensional

A análise dimensional é a matemática das dimensões das grandezas. Baseada no conceito de homogeneidade dimensional, formulado por Fourier em 1822, é um procedimento matemático que busca representar um fenômeno por meio de equações partindo do princípio de que todos os termos devem ser dimensionalmente homogêneos, ou seja, as dimensões em ambos os membros de uma equação devem ser as mesmas. Esta técnica foi apresentada inicialmente por Buckingham, por isso é chamada de "Teorema de Buckingham" ou "Teorema dos Π " (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 2004).

No estudo de um problema hidráulico, é necessário o conhecimento das variáveis mais relevantes e de suas dimensões. A maioria das relações físicas pode ser reduzida a grandezas fundamentais de força F, comprimento L e tempo T (ou massa M, comprimento L, e tempo T).

Embora o estudo das dimensões não possa produzir nenhuma solução analítica completa dos problemas físicos, a análise dimensional proporciona um instrumento para a solução de problemas que não permitem soluções analíticas e que devem ser resolvidos experimentalmente. Neste caso, a análise dimensional aponta o caminho para o máximo de informações com o mínimo de testes. Isto é realizado pela formação de grupos adimensionais, acarretando assim economia em tempo e recursos materiais. O uso de grupos adimensionais permite testar o efeito global das variáveis presentes em cada grupo com o efeito de cada variável isoladamente.

Além disso, tem aplicação no estabelecimento de índices de semelhança para a concepção, construção, operação e interpretação dos resultados de modelos físicos (GILES, 1970). O estudo dos modelos permite a previsão do desempenho de máquinas e estruturas hidráulicas em escala natural a partir de testes com modelos em escala reduzida (VENNARD; STREET, 1978). A ferramenta da análise dimensional juntamente com a semelhança hidráulica permite ao engenheiro organizar e simplificar as experiências e analisar o resultado das mesmas.

A análise dimensional também pode ser utilizada na solução de problemas em escoamento dos fluidos. Vitto Ferro (1997) estudou os fatores responsáveis pela perda de carga em tubos lisos e explicou o fenômeno com uma expressão adimensional utilizando o teorema de Buckingham. Demir, Yurdem e Degirmencioglu (2007) desenvolveram modelos matemáticos para determinar as perdas de carga em linhas laterais equipadas com emissores in-line e on-line inseridos a diferentes espaçamentos utilizando o teorema de Buckingham. O estudo resultou em uma equação para cada tipo de emissor com coeficientes de correlação elevados e valores próximos dos obtidos por modelos apresentados na literatura.

2.3 Equações de perda de carga

As equações encontradas na bibliografia utilizadas para estimar a perda de carga foram determinadas ou deduzidas teoricamente para um regime de escoamento específico, podendo ser utilizadas apenas para determinado regime ou intervalo deste (PORTO, 1998). Os regimes de escoamento dependem basicamente do número de Reynolds (*Re*), que é um grupo adimensional que ocorre com freqüência em problemas de mecânica dos fluidos. Recebe esse nome em homenagem a Osborne Reynolds, que na década de 1880, descobriu a sua importância na

diferenciação entre regimes de escoamento laminar e turbulento (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

O número de Reynolds representa a relação entre a força de inércia por unidade de área $(\rho D^2 V^2)$ e a tensão viscosa de um fluido newtoniano (μDV) , conforme a eq. (1). Assume importância nos fenômenos físicos em que as forças viscosas têm predominância. Quanto maior for o número de Reynolds, mais importantes são, comparativamente, as forças de inércia e menos relevantes as forças viscosas (GILES, 1970; VENNARD; STREET, 1978).

$$Re = \frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças viscosas}} = \frac{\rho V^2 D^2}{\mu V D} = \frac{\rho V D}{\mu}$$
(1)

em que, Re – número de Reynolds (adimensional), ρ - massa específica do fluido (kg m⁻³); V - velocidade média do escoamento (m s⁻¹); D - diâmetro do tubo (m) ; μ - viscosidade dinâmica do fluido (kg m⁻¹s⁻¹).

Considerando a viscosidade cinemática de um fluido a relação entre a viscosidade dinâmica (μ) e a massa específica (ρ) (eq. (2)), o número de Reynolds pode ser expresso em função da viscosidade cinemática, diâmetro do tubo e velocidade do escoamento da água conforme a eq. (3) (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \tag{2}$$

$$Re = \frac{V \cdot D}{v} \tag{3}$$

sendo: v – viscosidade cinemática da água (m² s⁻¹).

Azevedo Netto et al. (1998) e Neves (1982) citam que para Re < 2000, o regime de escoamento é laminar e para Re > 4000, o regime é turbulento. Entre esses limites, podem ocorrer tanto regime laminar quanto turbulento, mas de uma maneira instável, sendo que qualquer perturbação é capaz de mudar o regime.

Na maioria dos problemas de engenharia, o escoamento é turbulento, caracterizando-se pela trajetória irregular das partículas. Desta forma é impossível prever o seu traçado. Este movimento caótico aumenta a resistência ao escoamento, onde parte da energia do líquido é dissipada em outras formas de energia, como o calor.

Daniel Bernoulli estabeleceu que para um líquido ideal, ao longo de qualquer linha de corrente, é constante a soma da energia de posição (potencial), de velocidade (cinética) e de pressão, sendo esta soma denominada de carga total. De acordo com Munson, Young e Okiishi (2004), uma fração desta carga total é transformada em outros tipos de energia durante o processo de deslocamento de um fluido, definindo o termo perda de carga. Sendo assim, a equação de Bernoulli considerando a perda de carga em um tubo pode ser representada pela eq. (4):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + hf$$
(4)

em que: Z – energia de posição (m); P/γ – energia de pressão (m); $V_2/2g$ – energia de velocidade (m); hf – perda de carga (m).

O efeito da velocidade no sistema de escoamento foi comprovado pela experiência de Reynolds. No regime laminar, a velocidade é resultante apenas de uma componente longitudinal e a dissipação de energia é decorrente do deslizamento entre as camadas líquidas. Já no regime turbulento, a velocidade é resultante também de uma componente transversal, devendo ser considerada na perda de carga, os choques entre as partículas (NEVES, 1982).

2.4 Equações de perda de carga contínua

Alguns métodos foram desenvolvidos para determinar a perda de carga em tubos, mas a equação de Darcy-Weisbach é a mais aceita. A equação de Darcy-Weisbach resulta de estudos referentes à tensão da água nas paredes do tubo e é considerada teórica, pois foi deduzida com base nas leis de similaridade, que é uma ferramenta intimamente ligada com a análise dimensional (VON BERNUTH, 1990). Muitos autores argumentam que a equação de Darcy-Weisbach é a mais adequada para o cálculo da perda de carga em tubulações, já que envolve todas as variáveis responsáveis pelo fenômeno. Sua representação é feita pela eq. (5):

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$
(5)

em que, f – fator de atrito (adimensional); L – comprimento do tubo (m); g – aceleração da gravidade (m s⁻²).

Muitos projetistas preferem utilizar as equações de Hazen-Williams, Manning ou Scobey, pela simplicidade matemática das mesmas. Kamand (1988) salienta que estas equações trazem consigo a incerteza da estimativa da rugosidade das paredes, onde se considera um fator de rugosidade constante para todos os diâmetros e velocidades de escoamento, o que torna o resultado impreciso. A equação de Darcy-Weisbach traz consigo o grupo adimensional *f*, que é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa do tubo, portanto, o fator de atrito pode ser determinado através de equações matemáticas, uma para cada regime. Isto permite uma seleção mais adequada dos diâmetros dos tubos e da energia requerida pelo sistema.

Para o regime laminar o cálculo do fator de atrito pode ser feito pela equação de Hagen-Poiseuille (eq. (6)), que é dependente apenas do número de Reynolds (*Re*):

$$f = \frac{64}{Re} \tag{6}$$

Já o regime turbulento é válido para Re > 4000. Neste caso, além do número de Reynolds, a estimativa do valor *f* depende de outros fatores mais complexos, como a rugosidade relativa das paredes do tubo (ε/D), sendo ε a altura média das rugosidades do tubo.

No escoamento turbulento uniforme em tubos rugosos, *f* pode ser calculado pela equação de Colebrook-White (eq. (7)). Esta é uma combinação das equações de Prandtl e de von Karman sendo válida para $0 \le \epsilon/D \le 0.05$ e 2000 < $Re < 10^8$ (PORTO, 1998; ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; YOO; SINGH, 2002; SONNAD; GOUDAR, 2006; CARDOSO; FRIZZONE; REZENDE, 2008).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,52}{Re\sqrt{f}}\right)$$
(7)

Esta equação é válida também para o caso limite de tubos lisos ($\varepsilon = 0$) e escoamento completamente turbulento. Todavia, a exatidão do método de Colebrook-White é questionada por muitos pesquisadores. Von Bernuth (1990) cita que este método é ineficiente para cálculo de perda de carga em tubos plásticos de pequenos diâmetros.

No escoamento turbulento uniforme em tubos lisos, o coeficiente f independe da rugosidade do conduto, já que o tamanho das asperezas não influi na turbulência do escoamento.

Neste caso, a equação de von Karman (eq. (8)) pode ser utilizada para Re entre 4000 e 3,4 x 10⁶ (PORTO, 1998):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log\left(Re\sqrt{f}\right) - 0.8\tag{8}$$

No regime turbulento em tubos lisos, Blasius propôs uma equação (eq. (9)) fundamentada nas leis da similaridade, que é dada em função apenas do número de Reynolds, válida para 4000 $\leq Re \leq 10^5$:

$$f = \frac{c}{Re^m} \tag{9}$$

em que, $c \in m$ – coeficientes de Blasius, 0,316 e 0,25 respectivamente.

De acordo com Alves e Porto (2002) e Von Bernuth (1990), a equação de Blasius é válida para tubos hidraulicamente lisos desde que Reynolds não ultrapasse 10^5 . Quando *Re* é muito elevado, a precisão é reduzida, pois o fator de atrito se aproxima de zero. Quando *Re* < 4 x 10^3 , em regime laminar ou zonas críticas, a equação de Blasius superestima o fator de atrito. Para o escoamento na zona de transição, 2 x $10^3 < Re < 3 x 10^3$, o fator de atrito pode ser aproximado por um valor constante, igual a 0,04 (YITAYEW, 2009).

Muitos autores encontraram alternativas empíricas para solucionar o fator f. Estes deduziram equações do tipo potência semelhantes à de Blasius encontrando resultados satisfatórios. Utilizando diâmetros nominais de 16, 20 e 25 mm e números de Reynolds entre 3037 a 31373, Bagarello et al. (1995) propuseram uma aproximação semiteórica para estimar os fatores c (eq. (10)) e m (eq. (11)) da equação de Blasius:

$$c = \frac{6,152}{Re^{0,183}} \tag{10}$$

$$m = \frac{2}{\left(8 - \frac{12,4}{Re^{0.157}}\right)} \tag{11}$$

Para Juana, Rodrigues-Sinobas e Losada (2002a), a introdução do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach promove uma estimativa precisa das perdas de carga em regimes turbulentos com baixa rugosidade para $3000 \le Re \le 10^5$. Von Bernuth (1990) comenta que a combinação destas duas equações resulta uma equação dimensionalmente homogênea

(ambas possuem bases teóricas), exata para tubos plásticos quando $Re \le 10^5$ e adequada para tubos de pequenos diâmetros, já que Re neste intervalo não é restritivo em sistemas com diâmetros inferiores a 80 mm. Além disso, salienta que as mudanças de viscosidade podem ser facilmente corrigidas através de fatores disponíveis em tabelas.

A viscosidade cinemática (v) varia com a temperatura da água. De acordo com Reddy (2003), esta pode ser calculada para qualquer temperatura; com base na temperatura de 20°C pode-se utilizar a eq. (12):

$$v_T = (0,98)^{T-20} \cdot v_{20} \tag{12}$$

em que, v_T – viscosidade cinemática da água a uma temperatura T (m² s⁻¹); v_{20} – viscosidade cinemática da água a temperatura de 20°C (1,003 x 10⁻⁶ m² s⁻¹); T – temperatura da água (°C).

O uso de equações empíricas simples que não requerem o número de Reynolds pode levar a erros significativos. Por exemplo, uma mudança de 20° na temperatura provoca um erro de 11% no fator de atrito se a viscosidade é ignorada (VON BERNUTH, 1990).

2.5 Perda localizada de carga

O uso de conexões é indispensável na irrigação localizada. Conectores são encaixes introduzidos dentro de uma linha com objetivo de transpor o fluido. Ao ocupar uma área interna do tubo, o conector reduz o diâmetro de passagem do fluido modificando as linhas de fluxo e causando uma perda localizada de carga.

Para Caixeta (1991), sempre que ocorrer variação da velocidade devido a uma peça intercalada na tubulação haverá perda de carga, considerada singular, acidental ou localizada, pois o elemento causador da perturbação ocupa um pequeno comprimento em relação ao da tubulação. Conforme o mesmo autor, em regiões onde o fluido é acelerado, a energia estática é convertida em energia de velocidade sem causar grande dissipação de energia. Em regiões onde a velocidade diminui, quantidade significativa de energia é dissipada em virtude do grau de turbulência elevado que se verifica.

Comumente as perdas localizadas de carga são desconsideradas nos projetos. Yildirim (2007) efetuou um estudo onde dimensionou um projeto considerando e desconsiderando as

perdas localizadas de carga. Concluiu que negligenciando as perdas localizadas, obtem-se diâmetros e comprimentos de linhas errôneos.

Azevedo Netto et al. (1998) trata de situações onde a perda de carga é causada por expansões abruptas, sendo definida pelo teorema de Borda-Bélanger (eq. (13)):

$$hf = \frac{(V_I - V)^2}{2g}$$
(13)

em que: V_I – velocidade do fluido na seção menor (m s⁻¹); V – velocidade média do fluido na seção maior (m s⁻¹).

A eq. (13) pode ser entendida como uma fração da energia de velocidade, ou carga de velocidade, expressa classicamente pela variação da energia cinética multiplicada por um fator K (eq. (14)):

$$hf = K \frac{V^2}{2g} \tag{14}$$

em que: K – coeficiente de carga cinética ou de resistência de perfil.

Com base na eq. (14), observa-se que a perda de carga é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade da corrente fluida, ou seja, com o aumento da velocidade do fluido, aumenta a turbulência, incrementando a perda de carga.

O coeficiente *K* depende das características geométricas da peça e do número de Reynolds, reduzindo com o aumento de *Re* até certo limite a partir do qual se mantém constante (BAGARELLO et al., 1997; CARDOSO; FRIZZONE; REZENDE, 2008; JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002b; PROVENZANO; PUMO, 2004; RETTORE NETO et al., 2009).

Em emissores "on-line", *K* pode ser relacionado com a geometria da seção de escoamento através da aplicação do teorema de Bélanger a uma contração brusca e subsequente ampliação (eq. (15)):

$$hf = \frac{(V_1 - V)^2}{2g} = \left(\frac{A}{A_1} - I\right)^2 \frac{V^2}{2g}$$
(15)

em que: A – área de passagem do fluido no tubo sem emissor (m²); A_I – área de passagem do fluido na tubulação com emissor (m²).

O fator geométrico da eq. (15) é denominado índice de obstrução (*IO*) (eq. (16)), sendo *r* a razão de obstrução expressa na forma da eq. (17):

$$IO = \left(\frac{A}{A_1} - I\right)^2 = \left(\frac{1 - r}{r}\right)^2 \tag{16}$$

$$r = \frac{A_I}{A} \tag{17}$$

Relações empíricas foram propostas por Bagarello et al. (1997) (eq. (18)), Cardoso, Frizzone e Rezende (2008) (eq. (19)) e Alves e Porto (2002) (eq. (20)) para expressar K em função do grau de obstrução causado por protrusões na seção de escoamento:

$$K = 1,68 \cdot OI^{0,645} \tag{18}$$

$$K = 1,23 \cdot OI^{0,51} \tag{19}$$

$$K = 1,35 \cdot OI^{0,67} \tag{20}$$

Um coeficiente de carga cinética foi proposto por Zitterell et al. (2009) em um estudo da perda localizada de carga em conectores utilizados em microaspersão. Os autores encontraram que a perda localizada de carga na passagem lateral dos conectores é função do comprimento do conector e da carga cinética corrigida por um coeficiente K' igual a 50,226, conforme a eq. (21):

$$hf_c = K \frac{V_c^2}{2g} L_c \tag{21}$$

A perda localizada de carga em conectores também foi estudada por Melo, Silva e Faria (2000) que testou três modelos de conectores, tanto para o fluxo na passagem direta quanto na passagem lateral. Os autores ajustaram uma equação para cada modelo de conector em função da velocidade na linha lateral e velocidade à montante do conector. As equações apresentaram bons ajustes, porém só podem ser utilizadas para os modelos de conectores específicos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Instalações

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – USP, Piracicaba – SP.

A bancada esquematizada na Figura 1 foi composta dos seguintes elementos: reservatório de água; tubulação de sucção; motobomba; tubulação de recalque; tubulação de retorno; registros de gaveta; medidor de vazão magnético e uma seção de linha lateral, onde foram conectados tubo e manômetro.



Figura 1 - Croqui da bancada de ensaio de perda de carga. Legenda: 1 - reservatório de água; 2 - tubulação de sucção; 3 - conjunto motobomba; 4 - tubulação de recalque; 5 - tubulação de retorno; 6 - registros de gaveta; 7 - medidor de vazão magnético; 8 - seção de linha lateral; 9 - conector; 10 - tubo; 11 - manômetro

Para a determinação da seção de escoamento dos tubos ensaiados, utilizaram-se 20 segmentos em forma de anéis, medindo-se o diâmetro em um projetor ótico de perfil marca

Starrett modelo HB 400 (Figura 2). Foram utilizados tubos de 12 diâmetros diferentes. A Tabela 1 apresenta as medidas de diâmetro de cada modelo de tubo estudado.



Figura 2 - Diâmetro dos tubos no projetor ótico de perfil

	Diâmetro interno (mm)				
Tubo	Média (mm)	Desvio padrão (mm)	Coeficiente de variação (%)		
1	4,367	0,048	1,095		
2	4,135	0,038	0,924		
3	5,045	0,047	0,940		
4	4,126	0,024	0,592		
5	4,050	0,040	0,993		
6	4,469	0,029	0,657		
7	5,662	0,018	0,323		
8	4,093	0,029	0,714		
9	4,638	0,046	0,995		
10	12,854	0,059	0,458		
11	15,631	0,053	0,339		
12	9,573	0,207	2,161		

Tabela 1 - Características dos tubos utilizados no ensaio

Diferentes vazões foram obtidas pelo controle dos registros. As pressões na entrada do tubo foram monitoradas por um manômetro digital (escala 0 - 1471,050 kPa) com fundo de escala de 1 dígito decimal.

Os ensaios foram conduzidos para duas situações. Na primeira, foram ensaiados os tubos 1 a 9, cujos diâmetros inferiores aos demais, conduzem menores vazões. Para estes foi utilizado um conversor de sinal marca Krohne modelo IFC010 e medidor magnético indutivo marca Krohne, modelo KC1000 com capacidade de leitura de 0 a 1 m³/h (Figura 3A). Na segunda situação foram ensaiados os tubos 10, 11 e 12, cujas leituras de vazão foram efetuadas em um

medidor magnético indutivo fabricado pela Conaut modelo 465 e conversor de sinal fabricado pela Conaut modelo 474-A com capacidade de leitura de 0 a 8 m³/h (Figura 3B).





(B)

(A) Figura 3 - Medidores magnéticos indutivos

3.2 Determinação da perda de carga distribuída

Para a determinação da perda de carga distribuída no tubo, a seção de linha lateral da Figura 1 foi substituída por um segmento de PVC de 50 mm de diâmetro e 1 m de comprimento, conforme a Figura 4. Esta linha possuía uma tomada de pressão e um orifício, no qual o tubo foi inserido. A inserção do tubo neste orifício não ultrapassou a espessura da parede do PVC, o que exigiu atenção especial durante a execução. Um ressalto formado pelo microtubo no interior da linha lateral é indesejável, pois modifica as linhas de fluxo causando turbulência.



Figura 4 - Segmento de PVC instalado para medição de perda de carga distribuída no tubo

Os ensaios foram realizados de modo a medir a pressão na entrada do tubo e a vazão ao final. A perda de carga distribuída no tubo foi determinada através da aplicação do teorema de Bernoulli (eq. (4)). A energia de posição ($Z_1 e Z_2$) são componentes nulos neste ensaio, pois o microtubo estava em nível. A energia de pressão na alimentação do microtubo (P_1/γ) foi obtida pela leitura no manômetro conectado ao tubo de derivação. Já a energia de pressão no final do microtubo (P_2/γ) é nula, pois a água escoa livremente para a atmosfera. A carga de velocidade ($V_1^2/2g$) na entrada do microtubo foi desconsiderada, assumindo que não houve componente de velocidade na direção do microtubo no seu ponto de inserção. A carga de velocidade ($V_2^2/2g$) ao final do tubo foi determinada através da vazão, lida no medidor magnético. Com base nestes pressupostos, a perda de carga do microtubo pode ser representada pela eq. (22):

$$hf = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{P_1}{\gamma} \tag{22}$$

Foram efetuadas 9 a 10 repetições para cada diâmetro de tubo, dependendo da disponibilidade de material. Cada repetição do ensaio consistiu de um segmento de 20 m de tubo, posto em funcionamento com 15 pressões de operação, que variaram de 30 mca (294,210 kPa) até aproximadamente 4 mca (39,228 kPa) ou até que o número de Reynolds não fosse inferior a 3000. Considerou-se *Re* acima de 3000 como regime turbulento com o intuito de evitar as

incertezas de representação do fenômeno de perda de carga em regimes de transição. A condição de regime laminar foi descartada, pois o fator de atrito neste caso é definido como mostra a eq. (6).

Durante os ensaios a temperatura da água foi monitorada para corrigir a viscosidade cinemática nos cálculos da perda de carga.

Os dados coletados possibilitaram o ajuste de uma equação potencial na forma da eq. (23), relacionando a perda de carga com a vazão para cada diâmetro de microtubo. Para o ajuste, utilizou-se o software Table Curve 2D.

$$hf_t = k \cdot Q^n \tag{23}$$

em que: hf_t – perda de carga (m) no tubo com 20 m de comprimento; Q – vazão (m³ s⁻¹); $k \in n$ – constantes.

3.3 Determinação da perda localizada de carga

Para determinação da perda localizada de carga, considerou-se a condição em que o diâmetro do conector é inferior ao diâmetro do tubo. Os conectores foram caracterizados quanto ao diâmetro interno e dimensões. As medidas foram efetuadas no projetor ótico de perfil (Figura 5). As medições foram realizadas em 10 conectores de cada modelo e suas características estão apresentadas na Tabela 2 e Figura 6.



Figura 5 - Medidas das dimensões dos conectores no projetor ótico de perfil







	Características geométricas					
Conector	Área de protrusão	Diâmetro interno	Diâmetro interno	Comprimento do		
	no tubo – A (mm)	de entrada - D_{ie} (mm)	de saída - <i>D_{is}</i> (mm)	conector – L_c (mm)		
А	28,436	3,366	3,366	24,575		
В	23,284	2,456	2,456	35,231		
С	23,170	2,318	2,318	27,109		
D	33,785	3,909	3,909	21,483		
Е	33,102	2,943	2,943	24,222		
F	88,859	7,235	9,030	44,789		
G	90,970	7,206	11,378	51,026		
Н	101,183	7,028	12,006	65,046		
Ι	77,741	7,900	9,860	47,109		
J	63,326	6,100	7,940	56,039		
К	56,745	5,420	9,980	56,097		

Tabela 2 - Principais características dos conectores utilizados nos ensaios

Conforme pode ser observado na Figura 06, alguns conectores não possuem o diâmetro interno constante, como é o caso dos conectores F, G, H, I, J e K. Portanto, para efeito de caracterização, para os conectores A, B, C, D e E, consideram-se iguais os valores de diâmetro interno de entrada – D_{ie} e diâmetro interno de saída – D_{is} , de acordo com a Tabela 2.

Os conectores foram inseridos em tubos cujos diâmetros se adequassem ao referido conector. A Tabela 3 apresenta as combinações tubo/conector consideradas neste trabalho. Os conjuntos tubo/conector foram inseridos em seção de linha lateral de polietileno de 25 mm de diâmetro, 1,0 m de comprimento e com final fechado, como mostra o detalhe 9 da Figura 1. Distante de 15 cm da inserção foi instalada uma tomada de pressão, conforme a Figura 7.

Conjuntos					
Tubo	Conector	Tubo	Conector	Tubo	Conector
1	В	6	Е	10	Ι
2	В	7	D	10	К
3	В	8	Ε	11	G
4	А	9	Ε	11	Н
5	С	10	F	12	J

Tabela 3 - Combinações de tubo-conector



Figura 7 - Tubo, conector e manômetro inseridos na linha lateral de polietileno

A perda de carga no conjunto tubo mais conector foi obtida com base na eq. (22), medindo-se a pressão na entrada do tubo e a vazão ao final. Uma equação potencial relacionando a perda de carga com a vazão para cada diâmetro (eq. (24)) foi ajustada:

$$hf_{t+c} = k \cdot Q^n \tag{24}$$

em que: hf_{t+c} – perda de carga no tubo mais conector (m).

A perda de carga no conector foi determinada em função da diferença entre a perda de carga distribuída no tubo mais conector e a perda de carga do tubo sem conector (eq. (25)):

$$hf_c = hf_{t+c} - hf_t \tag{25}$$

em que: hf_c – perda de carga no conector (m).

Este procedimento foi executado arbitrando-se vazões e calculando as referidas perdas de carga pelas eq. (23) e (24). Optou-se por utilizar este artifício já que é impraticável repetir os mesmos valores de vazão para os testes de perda de carga distribuída no tubo mais conector e tubo sem conector. Uma nova equação foi ajustada por análise de regressão utilizando-se um modelo potencial (eq. (26)):

$$hf_c = k \cdot Q^n \tag{26}$$

3.4 Aplicação da Análise Dimensional – Teorema de Buckingham

Muitas são as variáveis que influenciam na perda localizada de carga. De acordo com Munson, Young e Okiishi (2004), quando o número de variáveis for igual a 4 ou mais, o teorema de Buckingham oferece uma excelente ferramenta para organização das grandezas em grupamentos adimensionais, conhecidos como termos Pi, a partir dos quais uma equação pode ser dedudiza.

O primeiro passo para aplicação do teorema requer que todas as variáveis do problema sejam listadas de forma não-redundate e expressadas nas suas dimensões básicas. As variáveis apresentadas na Tabela 4 são relativas à geometria do sistema e utilizadas para definir propriedades do fluido. Considerando estas variáveis, a seguinte relação pode ser escrita (eq. (27)):

$$hf_{c} = \phi(D_{t}, D_{ie}, D_{is}, L_{c}, V_{ec}, V_{sc}, V_{t}, g, v)$$
(27)

Em que, hf_c – perda localizada de carga no conector (m); D_t – diâmetro interno do tubo (m); D_{ie} – diâmetro interno de entrada do conector (m); D_{is} – diâmetro interno de saída do conector (m); L_c – comprimento do conector (m); V_{ec} – velocidade da água na entrada do conector (m s⁻¹); V_{sc} – velocidade da água na saída do conector (m s⁻¹); V_t – velocidade da água no tubo (m s⁻¹); g – aceleração da gravidade (m s⁻²); v – viscosidade cinemática da água (m² s⁻¹).

Natureza da variável Símbolo		Variável	Dimensão	Unidade
Dependente hf_c Perda localizada de ca		Perda localizada de carga no conector	L	m
	D_t	Diâmetro interno do tubo	L	m
	D_{ie}	Diâmetro interno de entrada do conector	L	m
	D_{is}	Diâmetro interno de saída do conector	L	m
	L_c	Comprimento do conector	L	m
Independente	V_{ec}	Velocidade da água na entrada do conector	L T ⁻¹	$m s^{-1}$
	V_{sc}	Velocidade da água na saída do conector	L T ⁻¹	$m s^{-1}$
	V_t	Velocidade da água no tubo	L T ⁻¹	$m s^{-1}$
	g	Aceleração da gravidade	L T ⁻²	$m s^{-2}$
	υ	Viscosidade cinemática da água	$L^{2} T^{-1}$	$m^2 s^{-1}$

Tabela 4 - Variáveis que afetam a perda localizada de carga em conectores

O número de termos Pi resultantes da análise dimensional é igual a k - r onde k é o número de variáveis do problema e r é o número de dimensões de referência necessário para descrever estas variáveis. O problema possui 10 variáveis e as dimensões de referência

usualmente são iguais às dimensões básicas, neste caso, 2 (L e T) resultando num total de 8 termos Pi (Tabela 5). O termo dependente, perda localizada de carga em conectores, pode ser escrito como uma função de grupos adimensionais como mostra a eq. (28):

$$\frac{hf_c}{D_t} = \phi \left(\frac{D_{ie}}{D_t}, \frac{D_{is}}{D_t}, \frac{L_c}{D_t}, \frac{V_{ec}}{V_t}, \frac{V_{sc}}{V_t}, \left(\frac{g \cdot D_t}{V_t^2} \right), \left(\frac{\upsilon}{(D_t \cdot V_t)} \right) \right)$$
(28)

Tabela 5 - Grupos adimensionais para predição da perda localizada de carga em conectores

Grupos adimensionais		Significância
Termo Pi	Função	Significancia
Π_1	$rac{hf_c}{D_t}$	Perda localizada de carga em conectores
Π_2	$rac{D_{ie}}{D_t}$	Relação entre diâmetro interno de entrada do conector e diâmetro interno do tubo
Π_3	$rac{D_{is}}{D_t}$	Relação entre diâmetro interno de saída do conector e diâmetro interno do tubo
Π_4	$rac{L_c}{D_t}$	Relação entre comprimento do conector e diâmetro interno do tubo
Π_5	$rac{V_{ec}}{V_t}$	Relação entre velocidade de entrada no conector e velocidade no tubo
Π_6	$rac{V_{sc}}{V_{t}}$	Relação entre velocidade de saída no conector e velocidade no tubo
Π_7	$\frac{g \cdot D_t}{V_t^2}$	Inverso do número de Froude
Π_8	$\frac{\boldsymbol{\mathcal{V}}}{\left(\boldsymbol{D}_{t}\cdot\boldsymbol{V}_{t}\right)}$	Inverso do número de Reynolds

Os valores de perda localizada de carga em cada um dos 15 conjuntos tubo/conectores foram tabulados em planilhas e os grupos adimensionais da Tabela 5 foram determinados. Os valores dos grupos adimensionais foram transformados aplicando-se a função logarítmica e uma equação linear múltipa foi ajustada no software SAS[®] (2002).

Para avaliar o desempenho do processo de estimativa de perda localizada de carga nos conectores, utilizou-se o Índice de confiança ou desempenho de Camargo – *C*, proposto por Camargo e Sentelhas (1997) (eq. (29)). O Índice de confiança ou desempenho de Camargo é obtido pela multiplicação do Índice de correlação de Pearson – r (eq. (30)) e o Índice de concordância de Willmott – d, proposto por Willmott (1981) (eq. (31)). Os Índices de confiança ou desempenho de Camargo são classificados conforme a Tabela 6.

 $C = r \cdot d \tag{29}$

$$r = \frac{N\left(\sum_{j=1}^{N} S_{j}O_{j}\right) - \left(\sum_{j=1}^{N} S_{j}\right)\left(\sum_{j=1}^{N} O_{j}\right)}{\sqrt{\left[N\sum_{j=1}^{N} \left(S_{j}\right)^{2} - \left(\sum_{j=1}^{N} S_{j}\right)^{2}\right]\left[\left(N\sum_{j=1}^{N} \left(O_{j}\right)^{2}\right) - \left(\sum_{j=1}^{N} O_{j}\right)^{2}\right]}}$$
(30)

$$d = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N} (S_j O_j)^2}{\sum \left(\left| S_j - \overline{O} \right| + \left| O_j - \overline{O} \right| \right)^2}$$
(31)

Em que, S_j = variável simulada; O_j – variável observada; \bar{O} – média da variável observada.

Tabela 6 -	Classificaçã	o do índice o	de confianca o	ou desempenho	o (C) de (Camargo e Sentelhas	(1997)
					- (-)		()

С	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
\leq 0,30	Péssimo

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perda de carga contínua no tubo

A Tabela 7 apresenta as equações ajustadas da perda de carga em 20 m de tubo observadas experimentalmente em função da vazão nos 12 diâmetros de tubos estudados. Para todos os diâmetros, as equações apresentaram coeficiente de determinação superior a 0,995 para o modelo potencial. O expoente da vazão variou entre 1,511 e 1,794. De acordo com Streeter e Wylie (1982) apud Caixeta (1991), as perdas de carga são proporcionais às potências de 1,7 a 2,0 da velocidade média. De modo semelhante, o expoente da equação de Darcy Weisbach com f calculado pela equação de Blasius é igual a 1,75. Estes valores caracterizam o regime de escoamento turbulento e são muito próximos dos valores encontrados neste trabalho.

Tubo	Diâmetro (mm)	Equação de perda de carga unitária	R ²
1	4,367	$hf_t = 1737420078,633 \ Q^{1,719}$	0,9994
2	4,135	$hf_t = 1534992937,068 \ Q^{1.689}$	0,9990
3	5,045	$hf_t = 802583962,366 \ Q^{1,703}$	0,9978
4	4,126	$hf_t = 230912518,123 \ Q^{1,511}$	0,9975
5	4,050	$hf_t = 2180401985,706 \ Q^{1,705}$	0,9984
6	4,469	$hf_t = 3220891626,453 \ Q^{1,794}$	0,9998
7	5,662	$hf_t = 879333089,033 \ Q^{1,777}$	0,9996
8	4,093	$hf_t = 4665373321,185 \ Q^{1,791}$	0,9990
9	4,638	$hf_t = 2482903556,852 \ Q^{1,784}$	0,9993
10	12,854	$hf_t = 14394953,025 \ Q^{1,745}$	0,9992
11	15,631	$hf_t = 5149837,182 \ Q^{1,736}$	0,9992
12	9,573	$hf_t = 35837896,632 \ Q^{1,711}$	0,9956

Tabela 7 - Equações de perda de carga contínua (m) em 20 m de tubo em função da vazão (m³ s⁻¹)

4.2 Perda localizada de carga nos conectores

A Figura 8 apresenta o comportamento da perda localizada de carga na passagem lateral do fluxo através dos conectores. A curva superior representa a perda de carga ajustada nos 20 metros de tubo com conector e a curva inferior é a perda de carga neste mesmo trecho, porém, sem a presença do conector. A diferença entre estas curvas é a perda de carga produzida por 1

conector. As equações ajustadas para as perdas de carga no tubo mais conector podem ser observadas na Tabela 8.







Figura 8 - Perda de carga (m) em 20 metros de tubulação em função da vazão (m³ s⁻¹) para o tubo e tubo mais conector

Conjunto	D_t (mm)	D_{ie} (mm)	Perda de carga no tubo + conector (hf_{t+c})	R ²
1B	4,367	2,456	$hf_{t+c} = 1909991085,753 \ Q^{1,718}$	0,9987
2B	4,135	2,456	$hf_{t+c} = 1434876989,077 \ Q^{1,673}$	0,9978
3B	5,045	2,456	$hf_{t+c} = 1054811010,174 \ Q^{1,709}$	0,9993
4A	4,126	3,366	$hf_{t+c} = 266842249,177 \ Q^{1,521}$	0,9967
5C	4,050	2,318	$hf_{t+c} = 2510672440,564 \ Q^{1,712}$	0,9932
6E	4,469	2,943	$hf_{t+c} = 3565100330,154 \ Q^{1,799}$	0,9993
7D	5,662	3,909	$hf_{t+c} = 1046342305,407 \ Q^{1,790}$	0,9996
8E	4,093	2,943	$hf_{t+c} = 5412294509,837 \ Q^{1,801}$	0,9995
9E	4,638	2,943	$hf_{t+c} = 2893410289,659 \ Q^{1,794}$	0,9993
10F	12,854	7,235	$hf_{t+c} = 24472838,835 \ Q^{1,787}$	0,9977
10I	12,854	7,900	$hf_{t+c} = 35421922,302 \ Q^{1,845}$	0,9580
10K	12,854	5,420	$hf_{t+c} = 27705288,522Q^{1,717}$	0,9116
11G	15,631	7,206	$hf_{t+c} = 20577458,131 \ Q^{1,878}$	0,9915
11H	15,631	7,028	$hf_{t+c} = 56596198,126 \ Q^{1,960}$	0,9914
12J	9,573	6,100	$hf_{t+c} = 47652034,462 \ Q^{1,727}$	0,9849

Tabela 8 - Equações de perda de carga (m) em 20 m de tubo com conector em função da vazão (m³ s⁻¹)

As perdas de carga nos conjuntos tubo+conector foram obtidas tomando como base a eq. (25). Arbitrando-se valores de vazão para as equações das Tabelas 7 e 8, a perda de carga para o conector foi determinada por diferença, dando origem a uma nova série de dados, possibilitando o ajuste de equações para a perda de carga no conector (Tabela 9). Portanto, as equações de perda localizada de carga são resultantes da diferença entre duas equações previamente ajustadas, o que justifica o coeficiente de determinação igual a 1.

Conjunto	D_i do microtubo (mm)	D_i do conector (mm)	Equação de perda localizada de carga	R ²
1B	4,367	35,231	$hf_c = 173360200,582 \ Q^{1,710}$	1
2B	4,135	35,231	$hf_c = 31990788,368 \ Q^{1,532}$	1
3B	5,045	35,231	$hf_c = 262508576,597 \ Q^{1,736}$	1
4A	4,126	24,575	$hf_c = 169214809,485 \ Q^{1,785}$	1
5C	4,050	27,109	$hf_c = 435745715,928 \ Q^{1,794}$	1
6E	4,469	24,222	$hf_c = 493235543,884 \ Q^{1,900}$	1
7D	5,662	21,483	$hf_{m+c} = 902892366,075 \ Q^{2,093}$	1
8E	4,093	24,222	$hf_c = 6027843710,311 \ Q^{2,130}$	1
9E	4,638	24,222	$hf_c = 897504111,193 \ Q^{1,961}$	1
10F	12,854	44,789	$hf_c = 14394953,025 \ Q^{1,745}$	1
10I	12,854	47,109	$hf_c = 2582790382,710 \ Q^{2,679}$	1
10K	12,854	56,097	$hf_c = 13791271,136 \ Q^{1,698}$	1
11G	15,631	51,026	$hf_c = 86511263,493 \ Q^{2,242}$	1
11H	15,631	65,046	$hf_c = 137808952,653 \ Q^{2,168}$	1
12J	9,573	56,039	$hf_c = 15958177,712 \ Q^{1,834}$	1

Tabela 9 - Equações de perda localizada de carga (m) para os conectores inseridos em diferentes tubos, em função da vazão (m³ s⁻¹)

A Figura 9 ilustra as curvas de perda de carga para os conjuntos tubo/conector. Observase que o mesmo conector (B) teve comportamentos diferentes quanto à perda de carga quando conectado em tubos de diâmetros diferentes (tubos 1, 2 e 3). O mesmo ocorreu para o conector E quando inserido nos tubos 6, 8 e 9. Este comportamento sugere que hf_c depende não somente do diâmetro da peça, mas também do diâmetro do tubo em que ele está inserido. Melo, Silva e Faria (2000) estudaram as perdas de carga na passagem lateral em conectores de 12, 14 e 16 mm, e estabeleceram uma relação entre o diâmetro do tubo e o diâmetro do conector, sendo que quanto maior esta relação (maior diferença entre diâmetros), maior é a perda de carga. Isto ocorre pois a perda localizada de carga resulta do choque de moléculas de água dotadas de velocidades diferentes, e quanto maior a diferença destas velocidades, mais intensa é a turbulência.



Figura 9 - Perda localizada de carga (m) para os conectores inseridos em diferentes tubos, em função da vazão (m³ s⁻¹)

4.3 Aplicação da Análise Dimensional – Teorema de Buckingham

A análise dimensional foi efetuada para os ensaios dos 15 conjuntos tubo/conectores e os coeficientes da eq. (28) foram determinados gerando a eq. (32):

$$\frac{hf_c}{D_t} = 1,093 \cdot \left(\frac{D_{ie}}{D_t}\right)^{-5,739} \cdot \left(\frac{D_{is}}{D_t}\right)^{2,156} \cdot \left(\frac{L_c}{D_t}\right)^{0,925} \cdot \left(\frac{V_{ec}}{V_t}\right)^0 \cdot \left(\frac{V_{sc}}{V_t}\right)^0 \cdot \left(\frac{g \cdot D_t}{V_t^2}\right)^{-1,291} \cdot \left(\frac{v}{D_t \cdot V_t}\right)^{0,611}$$
(32)

Para os termos $\left(\frac{V_{ec}}{V_t}\right)$ e $\left(\frac{V_{sc}}{V_t}\right)$ foram obtidos expoentes zero. De acordo com a

interpretação obtida no software SAS[®] (2002), $\left(\frac{V_{ec}}{V_t}\right)$ apresenta alta correlação linear com o

termo $\left(\frac{D_{ie}}{D_t}\right)$. Este fato é verdadeiro, pois a velocidade de entrada no conector (V_{ec}) é função do diâmetro interno de entrada no conector (D_{ie}) , assim como a velocidade no tubo (V_t) é função do diâmetro interno do tubo (D_t) . Da mesma forma ocorre com o termo $\left(\frac{V_{sc}}{V_t}\right)$, que apresentou

correlação linear com o termo $\left(\frac{D_{is}}{D_t}\right)$, pois a velocidade de saída do conector (V_{sc}) é função do

diâmetro interno de saída do conector (D_{is}) e a velocidade no tubo (V_t) é função do diâmetro interno do tubo (D_t) .

Uma das vantagens da aplicação do teorema de Buckingham é durante a análise de regressão múltipla: o termo que variar linearmente com outros termos presentes no fenômeno é anulado. A Tabela 10 apresenta os resultados da análise de regressão. Todos os termos Pi apresentaram elevada significância a 0,01% de probabilidade

Termos Pi	Expoente	Desvio Padrão	Teste t	$\Pr > t $
Constante	1,093	0,194	5,620	<0,0001
$rac{D_{ie}}{D_t}$	-5,739	0,156	-36,890	<0,0001
$rac{D_{is}}{D_t}$	2,156	0,160	13,450	<0,0001
$\frac{L_c}{D_t}$	0,925	0,078	11,840	<0,0001
$rac{V_{ec}}{V_t}$	0	-	-	-
$rac{V_{sc}}{V_t}$	0	-	-	-
$\frac{g \cdot D_t}{V_t^2}$	-1,291	0,032	-40,460	<0,0001
$\frac{\boldsymbol{\upsilon}}{\left(\boldsymbol{D}_{t}\cdot\boldsymbol{V}_{t}\right)}$	0,611	0,050	12,120	<0,0001

Tabela 10 - Resultados da análise de regressão múltipla para perda localizada de carga em conectores

O modelo obtido para perda de carga pode ser apresentado de maneira simplificada incluindo o valor da aceleração da gravidade g de 9,81 m s⁻¹. A viscosidade cinemática pode ser removida do cálculo considerando-se a temperatura padrão da água de 20°C, que produz uma viscosidade cinemática $v = 1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Simplificando os demais termos, a eq. (33) é apresentada:

$$Hf_{c} = 0,000141 \cdot D_{ie}^{-5,739} \cdot D_{is}^{2,156} \cdot L_{c}^{0.925} \cdot D_{t}^{1,756} \cdot V_{t}^{1,971}$$
(33)

De acordo com o modelo proposto, a perda localizada de carga em conectores é afetada pelas suas dimensões, diâmetro interno do tubo e velocidade de escoamento. O modelo proporcionou um coeficiente determinação de 93,31% com os resultados experimentais e é válido para as seguintes condições:

 $2,318 \le D_{ie} \le 7,900 \text{ mm}$ $2,318 \le D_{is} \le 12,006 \text{ mm}$ $21,483 \le L_c \le 65,046 \text{ mm}$ $4,050 \le D_t \le 12,854 \text{ mm}$ $0,363 \le V_t \le 7,580 \text{ m s}^{-1}$ $2405,599 \le Re \le 66670,140$

Se os valores mínimos de diâmetro e velocidade forem utilizados para calcular Reynolds, o resultado não será o limite mínimo apresentado de 2405,599, pois os valores de viscosidade variaram de acordo com a variação da temperatura da água durante os ensaios.

A Figura 10 compara os dados observados experimentalmente com o modelo proposto pela eq. (33) e com o modelo proposto por Zitterell et al. (2009). Esta última comparação apresentou uma limitação para alguns modelos de conectores que, conforme apresentado na Tabela 2 e Figura 6, não possuem diâmetro interno constante. Isto produz variação da velocidade dentro do conector. Para efeito de comparação, considerou-se um diâmetro interno médio do conector.









Figura 10 - Comparação entre dados de perda localizada de carga calculados pelo modelo proposto, observados experimentalmente e calculados pela equação de Zitterell et al. (2009)

Nota-se que os valores obtidos pelo modelo proposto neste trabalho tiveram uma boa concordância com os dados experimentais, o que pode ser verificado também na Figura 11. Verifica-se também que a equação proposta por Zitterell et al. (2009) apresentou bons resultados para os conectores de diâmetro constante (A, B, C, D e E). Para os conectores F, G, H, I, J e K, os valores de perda de carga foram superestimados, e os melhores ajustes se deram pela eq. (33), proposta neste trabalho. Fica evidente a importância da correta caracterização dos conectores e da utilização do máximo de informações sobre suas características para o cálculo da perda de carga, sendo a análise dimensional uma ferramenta útil para o estudo do fenômeno da perda de carga.



Figura 11 - Comparação entre dados de perda localizada de carga observada e calculada pelo modelo para conectores

Para cada conjunto foi determinado o coeficiente de correlação de Pearson (r) (eq. (30)), coeficiente de Willmott (d) (eq. (31)), e índice de confiança ou desempenho de Camargo e Sentelhas (C) (eq. (29)). Estes índices e coeficientes são apresentados na Tabela 11. Os coeficientes de correlação de Pearson (r) foram superiores a 0,9983, indicando uma ótima precisão das estimativas de perda de carga pelo modelo proposto. O coeficiente de Willmott indica a exatidão das estimativas, que variaram de 0,8740 a 0,9938. Os índices de confiança ou desempenho variaram de 0,8737 a 0,9938, sendo classificados como "muito bom" e "ótimo desempenho", de acordo com a Tabela 6. Este mesmo índice quando aplicado a todos os ensaios resultou valor de 0,9585, classificando-se como "ótimo desempenho".

Sentemas - C carculados para cada conjunto de tubo/conector e total geral									
Conjunto	r	d	С	Conjunto	r	d	С		
1B	0,9993	0,9676	0,9670	9E	1,0000	0,9938	0,9938		
2B	0,9984	0,9850	0,9834	10F	1,0000	0,8903	0,8903		
3B	0,9994	0,9651	0,9646	10I	0,9983	0,9763	0,9746		
4A	0,9996	0,8740	0,8737	10K	0,9999	0,9056	0,9055		
5C	0,9998	0,9272	0,9270	11 G	0,9996	0,9264	0,9260		
6E	1,0000	0,9845	0,9845	11H	0,9997	0,9591	0,9589		
7D	0,9999	0,9709	0,9708	12J	0,9998	0,9587	0,9585		
8E	0,9999	0,9302	0,9301	Total	0,9998	0,9587	0,9585		

Tabela 11 - Coeficiente de correlação de Pearson -r, coeficiente de Willmott - d e índice de confiança de Camargo e Sentelhas - C calculados para cada conjunto de tubo/conector e total geral

4.4 Aplicação

Para ilustrar o efeito da perda de carga provocada pelo microtubo e conector, uma linha lateral em nível foi dimensionada pelo procedimento passo-a-passo, iniciando-se pelo último emissor. O critério de uniformidade adotado foi uma variação máxima de vazão de 10,3% entre

os emissores localizados nas extremidades da linha $\left(\frac{q_{máx}}{q_{min}}\right) = 1,103.$

- a) Características do sistema:
- Microaspersor:

Equação característica: $q_{(Lh^{-1})} = 7,2758 \cdot H_{(mca)}^{0.5352}$

Pressão de serviço: 15 mca (147,105 kPa);

Vazão nominal: 31 L h⁻¹

Espaçamento entre emissores: 4 m;

• Microtubo:

Comprimento: 1,5 m;

Diâmetro interno: 4,09 mm

- Conector de microtubo: Comprimento: 24,22 mm Diâmetro interno: 2,95 mm Área de protrusão: 33,10 mm²
- Linha lateral:
 Diâmetro interno: 15,631mm
- Conector de linha lateral Comprimento: 56,039 mm Diâmetro interno de entrada: 6,100 mm Diâmetro interno de saída: 7,940 mm Área de protrusão: 63,326mm²

b) Cálculos:

A variação de vazão admitida entre emissores (10,3%) corresponde a uma variação máxima de pressão de 20%, calculada pela eq. (34):

$$\frac{H_{m\acute{a}x}}{H_{min}} = \left(\frac{q_{m\acute{a}x}}{q_{min}}\right)^{1/x}$$
(34)

em que: H – pressão do microaspersor (mca); q – vazão do microaspersor (L h⁻¹); x – expoente de fluxo do microaspersor; e os índices *máx* e *min* representam valores máximos e mínimos.

$$\frac{H_{máx}}{H_{min}} = 1,103^{1/0,5352} = 1,20$$
(35)

Estabeleceu-se como critérios de decisão no dimensionamento as variações de pressão e vazão nos emissores calculados pelas eq. (36) e (37). A pressão máxima na entrada da lateral foi assumida 17 mca (166,719 kPa), e a pressão mínima no final da lateral 14,23 mca (139,554 kPa), cujo H_{var} máximo na lateral foi 16,29%.

$$q_{var} \le \frac{q_{máx} - q_{min}}{q_{máx}} \cdot 100 \tag{36}$$

$$H_{\rm var} \le \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{min}}{H_{m\acute{a}x}} \cdot 100 \tag{37}$$

A transformação de $\frac{q_{máx}}{q_{min}}$, estabelecido como critério de uniformidade de vazão entre os

emissores da linha lateral, em H_{var} foi feita pela eq. (38) e este em q_{var} pela eq. (39).

$$H_{var} = 1 - \left(\frac{q_{máx}}{q_{min}}\right)^{-1/x} = 0,1674$$
(38)

$$q_{var} = 1 - (1 - H_{var})^{x} = 0,0934$$
⁽³⁹⁾

A partir dos limites de pressão, a linha lateral foi dimensionada inicialmente considerando-se apenas a perda de carga contínua, calculada pela equação de Darcy-Weisbach. O fator de atrito foi calculado pela equação de Blasius com coeficiente c igual a 0,3, sugerido por

Cardoso, Frizzone e Rezende (2008). O comprimento máximo da linha foi 104 m, com 26 emissores. A pressão calculada no primeiro emissor foi 16,63 mca (163,090 kPa) e no último 14,23 mca (139,554 kPa), com H_{var} de 14,43% e q_{var} de 8% entre os emissores extremos da lateral, atendendo ao critério estabelecido.

Uma segunda etapa do dimensionamento consistiu em verificar para essa linha quais seriam as variações de vazão e pressão entre os emissores das extremidades caso fossem consideradas as perdas localizadas de carga causadas pela passagem direta através dos conectores de microtubo, pela passagem lateral dos conectores de microtubo e de linha lateral e pelas perdas contínuas no microtubo.

A perda de carga provocada pela passagem direta do fluxo através do conector foi calculada pela eq. (40), onde K foi determinado pelo índice de obstrução (*IO*) expresso pela eq. (19) proposta por Cardoso, Frizzone e Rezende (2008). Para f, utilizou-se um valor médio de 0,035.

$$Le = \frac{K \cdot D}{f} \tag{40}$$

$$IO = \left(\frac{A}{A_1} - 1\right)^2 = \left(\frac{0,000238}{0,000205} - 1\right)^2 = 0,0259$$
(41)

$$K = 1,23 \cdot OI^{0,51} = 1,23 \cdot 0,0259^{0,51} = 0,191$$
(42)

Transformando a perda localizada de carga na passagem direta em comprimento equivalente, pela eq. (43), obteve-se 0,095 m de tubo. Este comprimento corresponde a um acréscimo no comprimento na linha lateral que pode ser expresso por um fator multiplicativo λ (eq. (44)), que considera o espaçamento entre os emissores e o comprimento equivalente:

$$Le = \frac{K \cdot D}{f} = \frac{0,191 \cdot 0,0174}{0,035} = 0,095$$
(43)

$$\lambda = \frac{S_{emissores} + Le}{S_{emissores}} = \frac{4 + 0,0954}{4} = 1,0238$$
(44)

A perda de carga foi calculada pela eq. (45) que considera o fator de atrito de Blasius para *c* igual a 0,3. O fator de múltiplas saídas de Chistiansen para 26 emissores é de 0,379 e a vazão total da linha foi assumida como a vazão média de cada emissor multiplicada por 26, sendo esta igual a 802,617 L h⁻¹.

$$Hf = 0,00074 \cdot Q^{1,75} \cdot D^{-4,75} \cdot F \cdot \lambda \cdot L$$
(45)

$$Hf = 0,00074 \cdot 0,000223^{1,75} \cdot 0,0174^{-4,75} \cdot 0,379 \cdot 1,0238 \cdot 104 = 2,766$$
(46)

As perdas localizadas de carga provocadas pela passagem lateral no conectores foram calculadas pela eq. (33). Para o conector de microtubo a perda foi de 0,1454 m. Para o conector de linha lateral, esta perda foi 1,35 m. A perda de carga contínua em 1,5 m de microtubo foi calculada pela equação de Darcy-Weisbach com *f* calculado por Blasius considerando c = 0,2902 e m = 0,25 conforme Zitterell et al. (2009) produzindo perda de 0,3222 m.

Na Figura 12 são apresentados os valores de q_{var} e H_{var} entre os emissores nos extremos da lateral, para o dimensionamento que considera apenas a perda de carga contínua na linha lateral (*Hf* no microtubo mais conectores = 0) e para os dimensionamentos que consideram perda de carga na passagem direta e diferentes valores de perdas de carga no conector mais microtubo. Verifica-se que ao se considerar apenas a perda de carga contínua na linha lateral, dimensiona-se uma tubulação de 104 m de comprimento máximo com q_{var} de 8,25% e H_{var} de 14,85%. Para esse mesmo comprimento de lateral, ao serem consideradas as perdas de carga na passagem direta dos conectores de microtubo, perdas na passagem lateral pelo conector de microtubo e conector de linha lateral e pela perda de carga no microtubo, as variações de vazão e pressão são aumentadas. Para a perda localizada de carga nos conectores mais microtubo igual a 1,8178 m, as variações de vazão e pressão foram de 13,41% e 23,59% respectivamente e violaram os critérios estabelecidos. Os critérios de uniformidade são violados para perdas de carga nos conectores mais microtubo superiores a 0,459m.



Figura 12 - Variação de vazão e pressão nos emissores localizados nos extremos de uma linha lateral de 104 m de comprimento, em função da perda de carga no microtubo mais conector

5 CONCLUSÕES

A aplicação do teorema de Buckingham permitiu a identificação das variáveis que afetaram a perda localizada de carga na passagem lateral dos conectores.

As variáveis significativas neste fenômeno e seus respectivos expoentes foram: diâmetro interno de entrada do conector, D_{ie} (-5,739); diâmetro interno de saída do conector, D_{is} (2,156), comprimento do conector, L_c (0,925); diâmetro interno do tubo, D_t (1,756) e velocidade de escoamento da água no tubo, V_t (1,971) corrigidos por uma constante (0,000141) com um coeficiente de determinação de 93,31%.

O modelo proposto neste estudo facilita o cálculo da perda de carga na passagem lateral de conectores com um ótimo índice de confiança quando utilizado dentro dos limites estabelecidos.

As variações de vazão e pressão entre os emissores situados nos extremos da linha lateral mostraram-se sensíveis às perdas localizadas de carga nos conectores.

REFERÊNCIAS

ALVES, P.R.V.; PORTO, R.M. Coeficiente geométrico para estimativa da perda de carga localizada em linhas laterais de irrigação por gotejamento. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 51-59, 2002.

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNADEZ Y FERNADEZ, M.; ARAUJO, R. de; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 670 p.

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.

_____. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v. 123, n. 1, p. 1-7, 1997.

CAIXETA, A.V. **Perda de carga em tubos e conexões de PVC utilizados em sistemas portáteis de irrigação por aspersão.** 1991. 115 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brazil. **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.

DEMIR,V.; YURDEM, H.; DEGIRMENCIOGLU, A. Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integrated in-line and on-line emitters using dimensional analysis. **Biosystems Engineering**, London, v. 96, n. 4, p. 617-631, 2007.

FERRO, V. Applying hypothesis off self-similarity for flow-resistance law of small-diameter plastic pipe. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering,** New York, v. 123, n. 3, p. 175-179, 1997.

FOX, R.W.; PRITCHARD, P.J.; MCDONALD, A.T. **Introdução à mecânica dos fluidos.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2006. 798 p.

GILES, R.V. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. Rio de Janeiro: McGraw-Hill do Brasil, 1970. 401 p.

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.

_____. 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 factors for pipe flow. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v. 114, n. 2, p. 311-323, 1988.

MELO, J.V.; SILVA, E.L.; FARIA, M.A. Perda de carga em conectores utilizados em sistemas de irrigação localizada. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 24, p. 205-214, 2000. Edição especial.

MUNSON, B.R.; YOUNG, D.F.; OKIISHI, T.H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 584 p.

NEVES, E.T. Curso de hidráulica. Porto Alegre: Globo, 1982. 578 p.

PORTO, R.M. Hidráulica básica. São Carlos: USP, EESC, 1998. 540 p.

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.

REDDY, K.Y. Evaluation of on-line trickle irrigation emitter barb losses. **The Journal of the Institution of Engineers,** London, v. 84, p. 42-46, 2002.

RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, J.A.; MIRANDA, J.H.; BOTREL, T.A. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 28-39, 2009.

ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZÓN, A. Improved explicit equation for estimation of the friction factor in rouge and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 86, n. 3, p. 369-374, 2002.

SCHIOZER, D. Mecânica dos fluidos. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 630 p.

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.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. **SAS:** Statistical Analysis System - Getting Started with the SAS® Learning Edition. Cary, 2002. 86 p. Disponível em: <www.sas.com>. Acesso em: 17 mar. 2010.

VENNARD, J.; STREET, R. **Elementos de mecânica dos fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 687 p.

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.

WILLMOTT, C.J. On the validation model. **Physical Geography**, Los Angeles, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

YILDIRIM, G. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering,** New York, v. 56, n. 4, p. 399-421, 1997.

YITAYEW, M. Simplified method for sizing laterals with two or more diameters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering,** New York, v. 135, n. 1, p. 111-114, 2009.

YOO, H.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.

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.