

HIDRÁULICA DE TUBOS GOTEJADORES COM EMISSORES CILÍNDRICOS

Verônica Gaspar Martins Leite de Melo¹, Leonardo Leite de Melo², José Antônio Frizzone³,
Antônio Pires de Camargo⁴, Fernando Campos Mendonça⁵

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi analisar a perda localizada de carga causada por gotejadores cilíndricos autocompensantes e não autocompensantes, integrados a tubos de polietileno utilizados em sistemas de gotejamento, e propor modelos empíricos, a partir das equações de Darcy-Weisbach e de Blasius para estimativa das perdas localizadas e contínua, como suporte para o dimensionamento hidráulico do sistema de irrigação. Foram realizados ensaios no Laboratório de Materiais de Irrigação da ESALQ/USP, utilizando tubos gotejadores de 20 mm de diâmetro nominal com espessuras de parede de 26 e 36 MIL. Concluiu-se que a perda de carga contínua pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando um fator de atrito calculado por uma função potência semelhante à de Blasius, com coeficientes $a = 0,3154$, para o tubo com espessura de parede de 26 MIL, $a = 0,3193$ para espessura de parede de 36 MIL, ambos com $b = 0,25$. Para o cálculo da perda localizada de carga foram obtidos coeficientes de carga cinética maiores para gotejadores autocompensantes (1,192 – 1,230) do que para gotejadores não autocompensantes (0,247 – 0,377), independente da espessura da parede do tubo.

PALAVRAS-CHAVE: linha lateral; irrigação por gotejamento; perda de carga

HYDRAULICS OF EMITTING-PIPES WITH INTEGRATED CYLINDRICAL DRIPPERS

ABSTRACT: The objective of this work was to quantify the local head loss due to pressure-compensating and non pressure-compensating cylindrical drippers integrated in polyethylene

¹ Aluna de Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas – ESALQ/USP. E-mail: veronica.martins@usp.br

² Aluno de Doutorado em Engenharia de Sistema Agrícolas – ESALQ/USP. E-mail: leoleitemelo@usp.br

³ Professor Titular do Departamento de Engenharia Biossistemas – ESALQ/USP. E-mail: frizzone@usp.br

⁴ Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP. E-mail: antonio.camargo@feagri.unicamp.br

⁵ Professor Doutor do Departamento de Engenharia Biossistemas – ESALQ/USP. E-mail: mendonca@usp.br

pipes used in drip irrigation systems, and to propose empirical models from the Darcy-Weisbach and Blasius equations to estimate minor and major losses and consequently to contribute with the hydraulic design of irrigation systems. Experiments were carried out at the Irrigation Testing Laboratory of ESALQ/USP, using emitting-pipes 20-mm diameter, 26- and 36-MIL wall thickness. The friction loss can be estimated by the Darcy-Weisbach equation using a friction factor based on the Blasius equation, with coefficients $a = 0.3154$ for the 26-MIL wall thickness and $a = 0.3193$ for the 36-MIL wall thickness, both with $b = 0.25$. The coefficient of minor loss was higher for pressure-compensating drippers (1.192 to 1.230) than non pressure-compensating models (0.247 to 0.377) regardless of the pipe wall thickness.

KEYWORDS: lateral line, drip irrigation, head loss

INTRODUÇÃO

Os sistemas de irrigação por gotejamento apresentam várias vantagens sobre outros sistemas de irrigação, mas é impossível obter uma distribuição ideal de água ao longo da linha lateral devido às variações na vazão do emissor causadas pelas variações da pressão de operação, diferenças de temperatura da água, variações de fabricação do emissor, obstrução dos emissores e variações de pressão por declive e perdas de carga por atrito. Assim, para o projeto de um sistema de irrigação por gotejamento que proporcione adequada uniformidade de distribuição de água, as propriedades dos componentes do sistema, especialmente as propriedades do emissor e perdas de carga por atrito nas linhas laterais, devem ser conhecidas (VEKARIYA; SUBBAIAH; MASHRU, 2011).

O cálculo das perdas contínuas e localizadas de carga em condutos pressurizados constitui um problema importante em estudos hidráulicos de sistemas de irrigação (BARDESTINI et al. 2017). As variações de pressão na linha lateral são ocasionadas pela perda de carga distribuída ao longo da tubulação, pelas perdas localizadas que ocorrem nos emissores e conexões e por variações de nível.

Emissores planos e cilíndricos soldados no interior de tubos gotejadores, causam perda localizada de carga, que ocorre quando o fluido sofre alguma perturbação brusca em seu escoamento, por algum elemento inserido no tubo. Já a perda de carga contínua, ou distribuída, ocorre pela dissipação de energia da água em forma de calor devido à resistência ao escoamento oferecida pela viscosidade do fluido e pela inércia das partículas (WANG et al., 2018).

Para os emissores cilíndricos integrados no interior de tubos de polietileno, estudos apresentam resultados que indicam que a perda localizada de carga tem influência importante na variação de pressão ao longo da linha lateral. Portanto, ao desconsiderá-las, pode ocorrer superdimensionamento das linhas laterais afetando, dessa forma, o desempenho do sistema (BAGARELLO et al. 1997; PROVENZANO e PUMO, 2004; PROVENZANO; PUMO e DI DIO 2005; RETTORE NETO et al., 2009; GOMES et al., 2010; CARDOSO et al., 2014).

Rettore Neto et al. (2009) encontraram valores de perda localizada de carga da ordem de 50% da perda de carga total, próximos aos relatados por Provenzano e Pumo et al. (2004), que indicam valores da ordem de 49,5% na pior condição analisada entre espaçamentos de emissores. Ao se tratar do comprimento da linha lateral, Gomes et al. (2010) estimaram um acréscimo de 25,7% e 9,5% no comprimento das linhas laterais considerando emissores compensados e não compensados, respectivamente.

O objetivo deste trabalho foi analisar a perda de localizada de carga causada por gotejadores cilíndricos autocompensantes e não autocompensantes, integrados a tubos de polietileno utilizados em sistemas de gotejamento, e propor modelos empíricos, a partir das equações de Darcy-Weisbach e de Blasius para estimativa das perdas localizadas de carga e contínua, como suporte para o dimensionamento hidráulico do sistema.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Materiais de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biosistemas – ESALQ-USP, Piracicaba, SP, Brasil. Os tubos gotejadores utilizados foram de polietileno, com emissores cilíndricos autocompensantes (AC) e não autocompensantes (NAC) de pressão integrados em seu interior, fabricados pela Mexichem® com diâmetro nominal de 16 mm e pressão de serviço 100 kPa. As características podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos tubos e emissores utilizados nos ensaios

Modelo	Vazão (L h ⁻¹)	Espessura de parede (MIL)	Espaçamento entre emissores	Amostra
Mexidrip NAC16mm	1,6	36	0,30	NAC1,6
Mexidrip NAC16mm	1,8	26	0,65	NAC1,8
Mexidrip NAC16mm	2,4	36	0,50	NAC2,4
Mexidrip NAC16mm	2,6	26	0,30	NAC2,6
Mexidrip AC16mm	1,6	36	0,60	AC1,6

Mexidrip AC16mm	1,7	26	0,60	AC1,7
Mexidrip AC16mm	2,7	36	0,60	AC2,7
Mexidrip AC16mm	2,9	26	0,60	AC2,9

Para determinação das perdas contínua, localizada e total de carga utilizou-se uma bancada de ensaios automatizada. Os procedimentos experimentais foram realizados utilizando-se seguimentos de tubos de 20 m de comprimento, em nível, retirados de bobinas de 1000 m. A pressão de ensaio foi monitorada e mantida constante por motobomba equipada com inversor de frequência e controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). O ajuste da vazão foi realizado pelo controle eletrônico da válvula proporcional Belimo® LRB24-3, com passagem de ½”, instalada a jusante da amostra sob ensaio. Para medição da vazão utilizou-se o medidor eletromagnético marca Krohne®, modelo IFC 010 D, com resolução de $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, faixa de vazão de 0 a $4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. A diferença de pressão proporcionada pelo escoamento através do tubo foi medida por um transmissor de pressão diferencial da marca Novus®, modelo NP800H, resolução $1 \times 10^{-2} \text{ kPa}$, faixa de medição de 1-100 kPa, exatidão de 0,075%

As perdas contínua, localizada e total de carga foram determinadas para a pressão de entrada de 100 kPa, utilizando-se vazões crescentes e decrescentes, em incrementos de $0,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Durante os ensaios, monitorou-se a temperatura da água por um transmissor de temperatura da marca Zurich®, modelo TZD 420, com resolução de $0,1^\circ\text{C}$, faixa de medição entre 0 e 50°C , incerteza de medição de 0,5% FE. A temperatura média da água durante os ensaios foi medida e feita a correção da massa específica da água em função da temperatura, especificada para a pressão atmosférica de 101,3 kPa e aceleração da gravidade de $9,807 \text{ m s}^{-2}$ de acordo com Tanaka (2001).

Para o estudo da perda de carga utilizou-se a equação de Darcy-Weisbach (Eq. 1), (YASMINA e RACHID, 2015). As variáveis envolvidas no cálculo da perda de carga unitária (J_C , m m^{-1}) são: a vazão (Q , $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), o diâmetro interno do tubo (D , m) e o fator de atrito (f , adimensional) que é função do número de Reynolds (R , adimensional) e da rugosidade relativa da superfície interna do tubo (ϵ/D), em que ϵ é a rugosidade da superfície interna do tubo (m).

$$J_C = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{8f}{g \pi^2} \frac{Q^2}{D^5} \quad (1)$$

Para escoamento turbulento hidraulicamente liso, com $4000 \leq R \leq 10^5$, f depende apenas de R e geralmente é calculado pela equação de Blasius ou por equações similares (Eq. 2), obtidas experimentalmente:

$$f = a R^{-b} \quad (2)$$

em que, na equação de Blasius $a = 0,3164$ e $b = 0,25$ para tubos lisos rígidos. O número de Reynolds é expresso pela Eq. (3):

$$R = \frac{4 Q}{\pi v D} \quad (3)$$

sendo v o coeficiente de viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), que é função da temperatura.

A perda localizada de carga é determinada experimentalmente e, para a maioria dos componentes, são fornecidas na forma adimensional (WANG et al. 2018). O método mais utilizado para determinar a perda localizada de carga (hf_L), baseia-se na Eq. (4):

$$hf_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

em que: K_L – coeficiente de carga cinética (adimensional); hf_L – perda localizada de carga (m); V – velocidade média de escoamento no tubo (m s^{-1}).

Para um segmento de tubo liso (sem gotejadores) de comprimento $L = 20$ m, em nível, com diâmetro nominal ($DN = 20$ mm) constante, foram obtidas curvas de perda de carga contínua unitária (J_c , m m^{-1}) em função da vazão (Q , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), na forma da Eq. (5):

$$J_c = K Q^\alpha \quad (5)$$

em que: K e α são constantes de ajuste do modelo.

Os valores experimentais da perda de carga foram utilizados para calcular o fator de atrito f da Eq. (1), explicitando-se f em função de J , $V^2/2g$ e D , que são quantidades conhecidas. O número de Reynolds foi calculado pela Eq. (3) com os dados experimentais. Para obter um modelo semelhante à Eq. (2), ajustou-se por regressão linear os valores experimentais de f em função de $R^{-0,25}$, obtendo-se o valor médio de a .

Dada a incerteza relacionada ao diâmetro interno dos tubos de polietileno, estimou-se hidraulicamente um diâmetro interno médio para os tubos de cada espessura de paredes (26 MIL e 36 MIL), utilizando-se a Eq. (6), derivada da Eq. (1).

$$D_h = \left(\frac{K_3 v^{0,25} Q^{1,75}}{J_c} \right)^{\frac{1}{4,75}} \quad (6)$$

em que: D_h – diâmetro hidráulico equivalente do tubo (m); v – viscosidade cinemática da água, assumindo-se o valor $1,004 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a temperatura da água de $23 \text{ }^\circ\text{C}$; Q – vazão ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) e J_c – perda de carga unitária obtida experimentalmente (m m^{-1}); K_3 – constante característica do tubo que engloba o fator de atrito.

A perda de carga total foi determinada com a tubulação em nível, utilizando-se tubos gotejadores com os orifícios vedados, obtendo-se curvas de perda de carga total unitária (J_T , m m^{-1}) em função da vazão (Q , $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), conforme Eq. (7).

$$J_T = K_1 Q^\beta \quad (7)$$

em que: K_1 e β são constantes de ajuste do modelo.

A perda localizada de carga provocada por um emissor (H_{f_L} , m) foi determinada pela diferença entre a perda de carga total no tubo com emissor (H_{f_T}) e a perda de carga contínua no tubo liso (H_{f_c}), dividida pelo número de emissores (N) no segmento de comprimento L , conforme Eq. (8) (RETTORE NETO et al. 2009; GOMES et al. 2010).

$$H_{f_L} = \frac{H_{f_T} - H_{f_c}}{N} \quad (8)$$

O coeficiente de carga cinética K_L , referente à expressão geral de perda localizada de carga (Eq.4), foi determinado pelo coeficiente angular obtido por regressão linear entre os valores experimentais da perda localizada no emissor (H_{f_L}) e da carga cinética.

Rearranjou-se os termos da equação de Darcy-Weisbach (Eq.1) e da expressão geral de perda localizada de carga (Eq.4), para determinação da perda localizada no emissor em termos de comprimento equivalente de tubulação (L_e , m), conforme Eq.(9):

$$L_e = \frac{2 g H_{f_L} D_h}{f V^2} \quad (9)$$

Inserindo a Eq.(2) na Eq. (9), obtém-se a Eq.(10) para o cálculo do comprimento equivalente utilizando-se o fator de atrito obtido experimentalmente para o tubo liso.

$$L_e = \frac{2 g H_{f_L} D_h}{a \left(\frac{4QV^{-1}}{\pi D_h} \right)^{-0,25} \left(\frac{4Q}{\pi D_h^2} \right)^2} \quad (10)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 1 observa-se a curva f em função de $R^{-0,25}$ para os dados experimentais, para os tubos lisos analisados. O coeficiente angular obtido foi $a = 0,3154$ para o tubo com espessura de parede de 26 MIL, e $a = 0,3193$ para espessura de parede de 36 MIL. Esses valores são próximos aos proposto por Blasius (0,3164), por se tratar de tubos lisos de polietileno. Para tubos de polietileno não colapsáveis, Bagarello et al. (1995) encontraram $a = 0,302$ e Rettore Neto et al. (2009) 0,296.

Para o tubo com espessura de parede de 26 MIL obteve-se $K_3 = 0,02484$ e para o tubo com parede de 36 MIL obteve-se $K_3 = 0,02454$. Com esses valores, os diâmetros médios

estimados pela Eq. (6) foram: para o tubo de 26 MIL $D_h = 13,4$ mm e para o tubo de 36 MIL $D_h = 13,5$ mm.

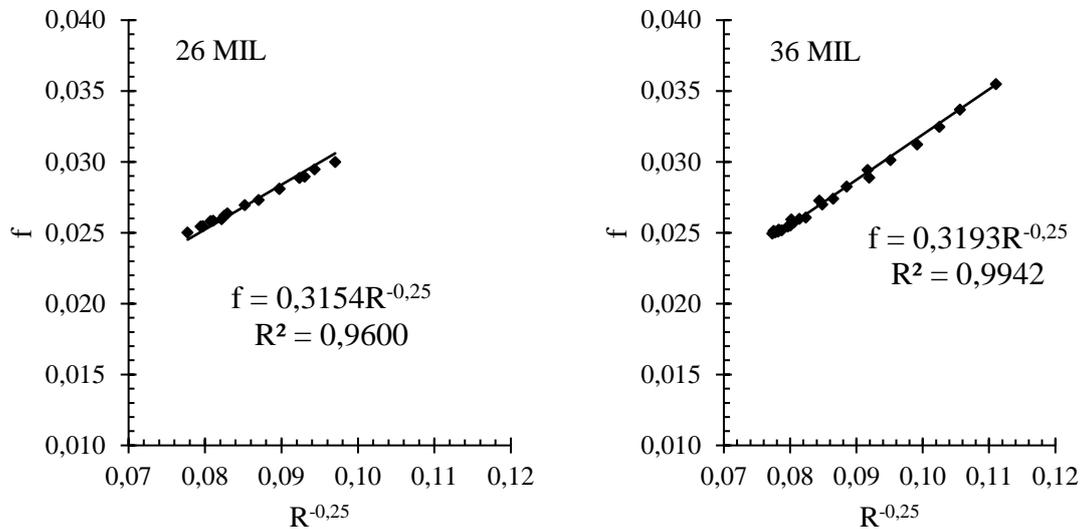


Figura 1. Fator de atrito (f) experimentais ajustados com $b = 0,25$ para os tubos de polietileno

As equações de perda contínua de carga estão apresentadas na Figura 2, para cada espessura de parede. Os expoentes da vazão, para as duas espessuras de parede caracterizam regime de escoamento turbulento. As curvas de perda de carga total (J_T , m^{-1}) em função da vazão (Q , $m^3 s^{-1}$) para todos os modelos de tubos gotejadores são apresentadas na Figura 3. Utilizando as equações obtidas pela análise de regressão, e fixando uma vazão de $20 \times 10^{-5} m^3 s^{-1}$, verifica-se que os tubos gotejadores autocompensantes proporcionaram maiores perdas de carga unitárias totais quando comparados aos demais modelos não autocompensantes. Essa diferença nos valores de perda unitária total de carga é justificado pela geometria do gotejador, uma vez que o dispositivo responsável pela regulação da pressão ocupa maior fração da área de escoamento. O mesmo comportamento foi observado por Gomes et al. (2010), também trabalhado com tubos gotejadores com emissores cilíndricos autocompensantes e não autocompensantes de pressão.

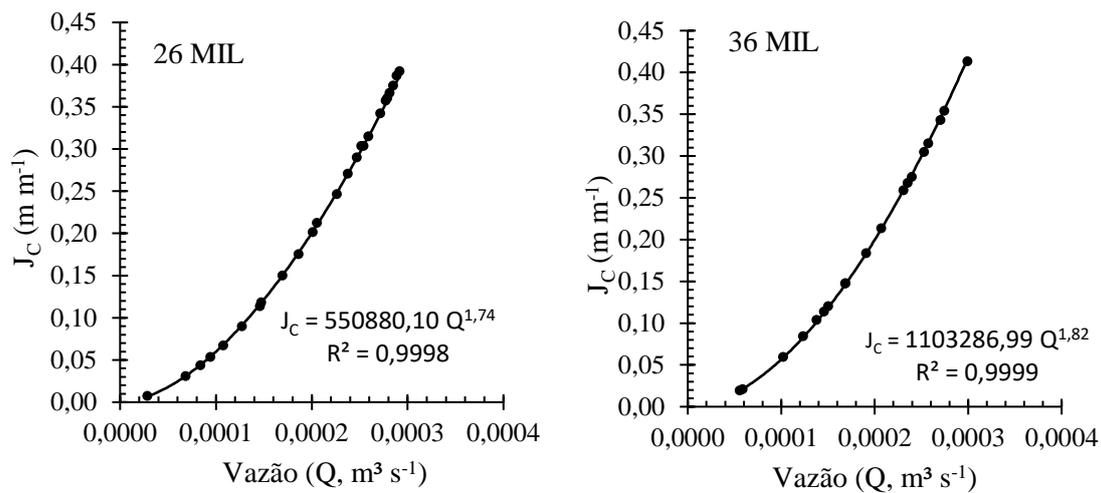
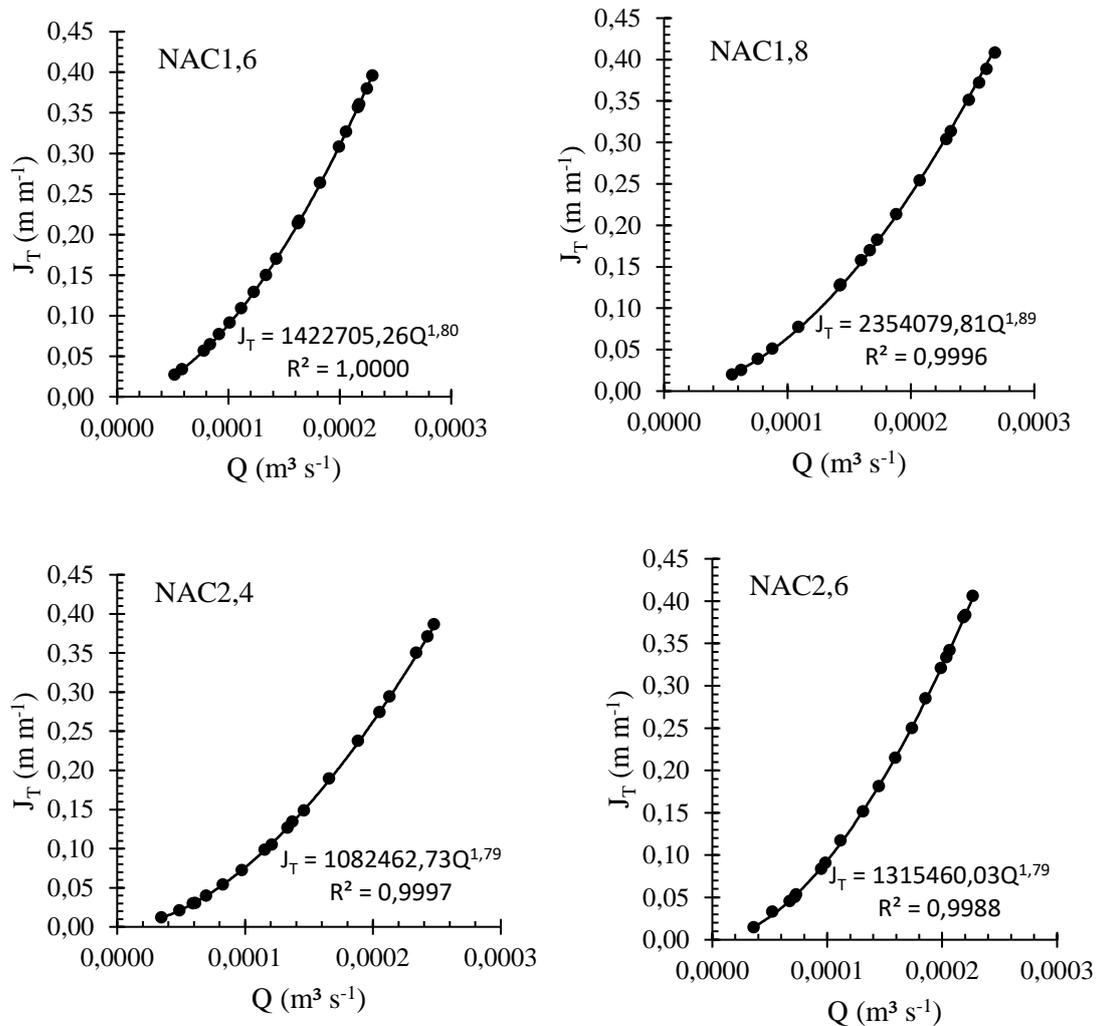


Figura 2. Perda de carga unitária contínua (J_C , $m\ m^{-1}$) em função da vazão (Q , $m^3\ s^{-1}$) para o tubo liso de polietileno para espessuras de paredes de 26 MIL ($D_h = 13,4\ mm$) e 36 MIL ($D_h = 13,5\ mm$)



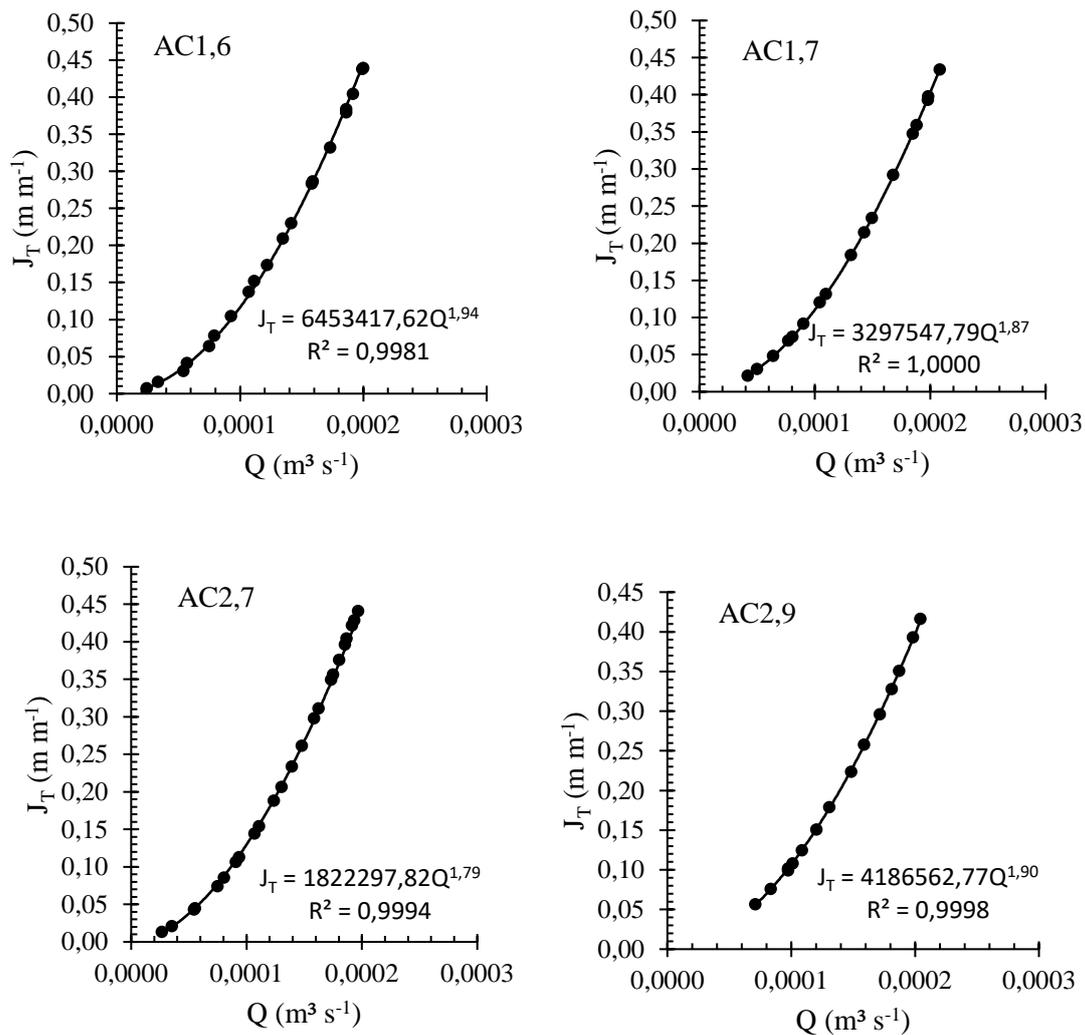


Figura 3. Perda de carga unitária total (J_T) em função da vazão (Q)

Na Tabela 2 são apresentados os valores de K_L obtidos por regressão linear entre H_{fL} e $V^2/2g$. Nos ajustes foram obtidos $R^2 \geq 0,9958$. Apresentam-se também os comprimentos equivalentes calculados pela Eq. (10). Verifica-se que os modelos com dispositivos autocompensantes de pressão, apresentaram maiores valores de coeficiente de carga cinética (K_L) e, conseqüentemente, maiores valores de comprimento equivalente (L_e) em comparação aos modelos não autocompensantes. O mesmo foi observado por Gomes et al. (2010).

Tabela 2. Coeficientes de carga cinética (K_L) e comprimento equivalente (L_e) calculado pela Eq.(10) para os modelos de tubos gotejadores avaliados

Modelo	Diâmetro Hidráulico (m)	Parâmetro K_L da		L_e (m)	R^2
		Eq. (4)	Intervalo Reynolds		
NAC1,6	0,0134	0,322	6736,6 - 19341,4	0,163	0,9991
NAC1,8	0,0135	0,247	6686,7 - 19198,1	0,126	0,9923
NAC2,4	0,0134	0,301	6765,4 - 19341,7	0,152	0,9997
NAC2,6	0,0135	0,377	6576,6 - 19198,1	0,192	0,9988
AC1,6	0,0134	1,192	6734,5 - 19654,2	0,602	0,9987

AC1,7	0,0135	1,230	6654,7 - 19175,2	0,626	0,9991
AC2,7	0,0134	1,213	7654,5 - 20134,1	0,612	0,9958
AC2,9	0,0135	1,194	7263,2 - 19874,3	0,608	0,9999

Na Figura 3 apresenta-se K_L em função do número de Reynolds (R) para os modelos de gotejadores estudados. Pode-se observar que os valores de K_L , para cada modelo de gotejador estudado, varia pouco para $R > 10.000$. Esse comportamento também foi observado por Bagarello et al. (1997), Provenzano e Pumo (2004) e Gomes et al. (2010). Isso indica que o escoamento através da seção de passagem pelo gotejador é dominado pelos efeitos de inércia, sendo secundários os efeitos viscosos. É notável a diferença entre os gotejadores com dispositivo autocompensantes de pressão e os não autocompensantes, observando-se dois grupos distintos, mas com comportamento semelhante.

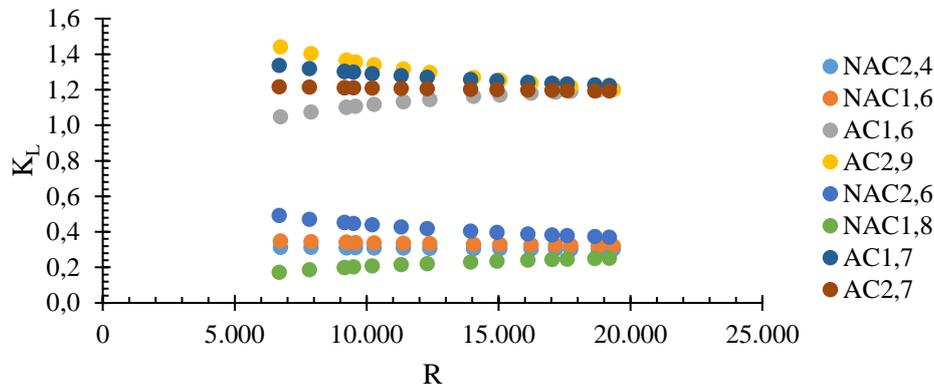


Figura 3. Valores médios de K_L em função de R

CONCLUSÕES

- 1) A perda contínua de carga pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando um fator de atrito calculado por uma função potência semelhante à de Blasius, com coeficiente $a = 0,3154$ para o tubo com espessura de parede de 26 MIL, e $a = 0,3193$ para espessura de parede de 36 MIL, ambos com $b = 0,25$.
- 2) Para o cálculo da perda localizada de carga foram obtidos coeficientes de carga cinética maiores para gotejadores autocompensantes (1,192 – 1,230) do que para gotejadores não autocompensantes (0,247 – 0,377), independente da espessura da parede do tubo.

3) Os valores do coeficiente de carga cinética (K_L), para cada modelo de gotejador estudado, variou pouco para $R > 10.000$, indicando que o escoamento através da seção de passagem pelo gotejador é dominado pelos efeitos de inércia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARDESTANI, S.; GIVEHCHI, M.; YOUNESI, E.; SAJJADI, S.; SHAMSHIRBAND, S.; PETKOVIC, D. Predicting turbulent flow friction coefficient using ANFIS technique. *Signal, Image and Video Processing*, v.11, n.2, p.341-347, 2017.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.123, n.1, p.1-7, 1997.

CARDOSO, G. G. De G.; KLAR, A. E. Índice geométrico e perda de carga localizada em conexões de emissores "online". *Engenharia Agrícola*, p. 1114-1127, 2014.

GOMES, A. W. A.; FRIZZONE, J.A.; RETTORE NETO, O.; MIRANDA, J.H.; Perda de carga localizada em gotejadores integrados em tubos de polietileno. *Engenharia Agrícola*, v.30, n.3. p.435-446, 2010.

PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.130, n.4, p.318-324, 2004.

RETTORRE 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. 8-39, 2009.

TANAKA, M.; GIRARD, G.; DAVIS, R.; PEUTO, A.; BIGNELL, N. Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports. *Metrologia*, v. 38, p. 301-309, 2001.

VEKARIYA, P.B; SUBBAIAH, R.; MASHRU, H.H. Hydraulics of microtube emitters: a dimensional analysis approach. *Irrigation Science*, v.29, p.341-350, 2011.

YASMINA, L.; RACHID, L. Evaluation of energy losses in pipes. *American Journal of Mechanical Engineering*, v.3, p.32-37, 2015.

WANG, Y., ZHU, D., ZHANG, L., ZHU, S. Simulation of Local Head Loss in Trickle Lateral Lines Equipped with In-line Emitters Based on Dimensional Analysis. *Irrigation and Drainage*, 67 (4), pp. 572-581, 2018.