

## ARTIGO TÉCNICO

### QUANTIFICAÇÃO DO ERRO NA DETERMINAÇÃO DA PERDA CONTÍNUA DE CARGA EM TUBOS ELÁSTICOS

OSVALDO RETTORE NETO<sup>1</sup>, TARLEI A. BOTREL<sup>2</sup>, JOSÉ A. FRIZZONE<sup>3</sup>,  
MARINALDO F. PINTO<sup>4</sup>, ANTÔNIO P. CAMARGO<sup>5</sup>

**RESUMO:** A indústria de plásticos e derivados, com o auxílio da engenharia, tem aprimorado a qualidade do material destinado à fabricação de tubos, principalmente os de polietileno. A elasticidade desses tubos permite que ocorra aumento do diâmetro interno com o aumento da pressão, o que não é levado em consideração pelos equacionamentos matemáticos utilizados para a determinação da perda de carga. O objetivo deste trabalho foi quantificar os erros na determinação da perda de carga em tubos elásticos, em função da pressão de entrada na linha lateral, comparando valores observados e estimados pelas equações recomendadas na literatura técnica. Avaliaram-se 3 amostras de tubo de polietileno sob 9 pressões de entrada e 3 vazões, sendo estas correspondentes às velocidades de 1,0; 1,5 e 2,0 m s<sup>-1</sup>. Efetuou-se a medição do diâmetro externo dos tubos nas pressões entre 0 a 588,4 kPa, com incrementos de 49,05 kPa. Para todas as condições avaliadas, foi possível constatar que a pressão afeta a perda contínua de carga em tubos elásticos, sendo esta superestimada pelas equações de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Flamant.

**PALAVRAS-CHAVES:** perda de carga contínua, irrigação localizada, tubos de polietileno.

### ERROR QUANTIFICATION ON DETERMINING CONTINUOUS HEAD LOSS OF ELASTIC TUBES

**ABSTRACT:** The plastics industry and its derivatives, with the help of engineering have improved the quality of materials used for manufacturing pipes, mainly polyethylene. The elasticity of polyethylene tubes allows diameter increases as pressure rises, which is not taken into account by the mathematical equations used to determine the head loss. The purpose of this research was to quantify the errors on head loss determining in elastic tubes as a function of inlet pressure on the lateral line, comparing observed and estimated values by equations recommended in the technical literature. Three samples of polyethylene pipe were evaluated under 9 inlet pressures and 3 flow rate conditions, which corresponds to velocities of 1.0, 1.5 and 2.0 m s<sup>-1</sup>. Measurements for determining the outside diameter of the tubes were carried out under pressures from 0 to 588.4 kPa incrementing 49.05 kPa each step. For all evaluated conditions it was verified that pressure affects the continuous head loss in elastic tubes and the equations of Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, and Flamant overestimate the results.

**KEYWORDS:** continuous head loss, microirrigation, polyethylene tubes.

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Rural, FAEM/UFPEL, Pelotas-RS, osvaldo.rettore@ufpel.edu.br.

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, Prof. Titular, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba-SP, tabotrel@usp.br.

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Prof. Titular, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba – SP, frizzone@usp.br.

<sup>4</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, Doutor em Irrigação e Drenagem, Pesquisador, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba – SP, marinaldopinto@usp.br.

<sup>5</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem, Pesquisador, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Piracicaba – SP, apcpires@usp.br.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 2-6-2011

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 29-5-2013

## INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada é, hoje, o maior consumidor de água no mundo, e como a matriz energética brasileira está baseada na produção de energia hidroelétrica, há necessidade de constantes aprimoramentos técnicos e científicos para maximizar o uso da água e racionalizar o consumo energético para aumentar as áreas de produção agrícolas com os recursos naturais disponíveis (RETTORE NETO, 2011).

Nos projetos hidráulicos de irrigação, as perdas de carga totais são contabilizadas visando a maximizar a uniformidade de distribuição de água e a selecionar um conjunto motobomba mais adequado ao sistema de irrigação, minimizar os custos anuais e de implantação do projeto. Com o uso da informática, cálculos são resolvidos com facilidade, permitindo o emprego de modelos cada vez mais complexos para o cálculo da perda de carga nos sistemas de irrigação.

A perda contínua de carga representa a dissipação de energia da água em forma de calor, ao longo da tubulação, decorrente da resistência ao escoamento oferecida pela viscosidade do fluido e pela inércia das partículas, sendo variável com a rugosidade da parede do tubo, diâmetro da tubulação e com a velocidade da água (PORTO, 2006).

Os equacionamentos utilizados para cálculos da perda contínua de carga, utilizados atualmente, foram desenvolvidos para materiais utilizados na época, sendo a equação de Darcy, em 1857, Flamant em 1892 e Hazen-Williams de 1903 a 1920 (AZEVEDO NETO & ALVAREZ, 1982). Nas últimas décadas, a tecnologia de produção de tubos foi sendo aprimorada, principalmente os de polietileno, empregados em grande escala em projetos de irrigação localizada, como nas linhas laterais, cujo objetivo é conduzir e aplicar a água necessária à cultura por meio de dispositivos, como gotejadores e microaspersores.

A elasticidade dos tubos de polietileno tende a aumentar seu diâmetro quando se eleva a pressão e, com isso, tende-se a estimar maiores perdas de carga do que aquelas que realmente ocorrem, elevando, conseqüentemente, a potência do sistema. Além do consumo energético, a pressão excessiva na linha lateral pode elevar a vazão dos emissores, fazendo com que estes operem fora das condições previstas no projeto.

O objetivo deste trabalho foi quantificar os erros na determinação da perda de carga em tubos elásticos, em função da pressão de entrada na linha lateral, comparando valores observados e estimados pelas equações recomendadas na literatura técnica.

### Considerações Teóricas

#### Perda contínua de carga

A perda de carga em escoamentos turbulentos permanentes e uniformes de fluidos reais, em tubos de seção cilíndrica, pode ser calculada por diferentes equações. A contribuição mais importante é expressa pela equação de Darcy-Weisbach, dada pela eq. (1) (VALIANTZAS, 2008; RETTORE NETO et al., 2009b):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

em que;  $h_f$  – perda contínua de carga na tubulação (m);  $L$  – comprimento do tubo (m);  $D$  – diâmetro interno do tubo (m);  $V$  – velocidade média do escoamento ( $m\ s^{-1}$ );  $g$  – aceleração da gravidade ( $m\ s^{-2}$ );  $f$  – fator de atrito, dependente do número de Reynolds ( $R$ ) e da altura das asperezas ( $\epsilon$ , em m) nas paredes internas do tubo.

Na equação de Darcy-Weisbach, a estimativa do fator de atrito ( $f$ ) é essencial para o cálculo da perda contínua de carga. Para escoamento laminar ( $R < 2.000$ ), o cálculo de  $f$  é feito pela equação de Hagen-Poiseuille ( $f = 64/R$ ), sendo apenas função do número de Reynolds ( $R$ ), que depende exclusivamente das propriedades do fluido, do diâmetro do tubo e da velocidade do escoamento.

No escoamento permanente turbulento e uniforme em tubos, a estimativa do fator de atrito é mais complexa, pois  $f$  é uma função da rugosidade relativa das paredes do tubo ( $\varepsilon/D$ ) e do número de Reynolds. Assim, para  $4.10^3 \leq R < 10^8$  e  $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$ , a equação de Colebrook-White é a mais utilizada para calcular  $f$  (SONNAD & GOUDAR, 2006; CARDOSO et al., 2008), sendo válida também para o caso limite de tubos lisos ( $\varepsilon = 0$ ). Para o regime de transição ( $2.000 \leq R < 4.000$ ), as características do escoamento são indeterminadas.

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 das paredes internas do tubo, podendo ser calculado em função do número de Reynolds. Para  $4000 \leq R \leq 100.000$ , o cálculo do fator de atrito pode ser feito por uma equação simples, como na forma proposta por Blasius (PORTO, 2006), cuja equação é uma função somente do número de Reynolds representada pela eq. (2):

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

Ao propor a eq. (2) para calcular  $f$ , Blasius determinou ( $m$ ) como uma constante de valor igual a 0,25, enquanto o coeficiente ( $c$ ) é outra constante equivalente a 0,316. Para BERNUTH (1990), a inserção do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach resulta 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  $4.000 \leq R \leq 100.000$ , 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 no trabalho de BERNUTH (1990), que apresenta bons resultados usando equações potenciais, semelhantes à de Blasius. ZITTERELL et al. (2009) 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 ( $3.037 < R < 31.373$ ) ao se alterar a temperatura, obtendo  $c = 0,302$  para  $m = 0,25$ . RETTORE NETO et al. (2009a), analisando tubos de polietileno utilizados em linha lateral de irrigação por gotejamento, ajustaram  $c = 0,296$  para  $m = 0,25$ .

Para  $2.000 \leq R < 4.000$  o regime de escoamento é indeterminado e a aplicação da eq.(2) com os coeficientes de Blasius pode superestimar o fator  $f$  (ZITTERELL et al., 2009), embora a perda de carga nesse regime de escoamento seja muito pequena. Para este caso, o fator  $f$  pode ser aproximado pela eq. (3), conforme recomenda (PORTO, 2006).

$$f = 2,82 \times 10^{-7} R^{1,52} \quad (3)$$

Segundo BERNARDO (1995), há diversas equações para o cálculo da perda de carga nas tubulações. Porém, as duas mais usadas no dimensionamento de tubulações de irrigação por gotejamento são as equações de Hazen-Williams e de Darcy-Weisbach. A equação de Hazen-Williams pode ser escrita da seguinte forma:

$$j = 1,21 \times 10^{10} \left( \frac{Q}{C} \right)^{1,852} d^{-4,87} \quad (4)$$

em que:  $j$  – perda de carga unitária ( $m \ m^{-1}$ );  $Q$  – vazão ( $L \ s^{-1}$ );  $C$  – coeficiente que depende da natureza da parede do tubo;  $d$  – diâmetro interno do tubo (mm). Oliveira & Bernardo (1979), citado por BERNARDO (1995), encontraram valor de  $C$  igual a 144 para tubos de polietileno com diâmetros nominais de 9,5 mm a 12,77 mm.

SILVA et al. (2003) sugeriram que o cálculo da perda de carga na linha lateral de polietileno fosse feito pela equação de Flamant, apresentada na forma:

$$j = 0,473 d^{-4,75} Q^{1,75} \quad (5)$$

em que:  $j$  – perda de carga unitária ( $m m^{-1}$ );  $d$  – diâmetro da tubulação (mm);  $Q$  – vazão da linha lateral ( $L h^{-1}$ ).

## MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Irrigação e Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biosistemas - ESALQ/USP, Piracicaba-SP. Montou-se uma bancada de ensaio em circuito hidráulico fechado para pressurização em regime dinâmico do fluido (água), que facilitou o controle, o monitoramento e a aquisição dos dados necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Utilizou-se um reservatório com capacidade de 28.000 L e uma motobomba de 2,0 CV, vazão entre 0 e  $5,5 \cdot 10^{-4} m^3 s^{-1}$  e pressão variando de 0 a 784,6 kPa. No recalque, foram instalados dois registros de gaveta e uma válvula reguladora de pressão de diafragma para controlar a pressão de entrada no tubo.

A condução da água do sistema de bombeamento e controle até o início da linha (tubo de polietileno) foi feita por meio de tubos flexíveis de alta pressão, com diâmetro de 1". A conexão entre os tubos foi feita por adaptadores internos, abraçadeiras e conexões hidráulicas (luva de união e bucha de redução). Tubos com 40 m, e instalados em nível, foram utilizados para a determinação da perda contínua de carga. Na Tabela 1, apresentam-se as características técnicas do tubo utilizado.

TABELA 1. Características do tubo utilizado no ensaio. **Tube characteristics used in the experiment.**

Fabricante	Diâm. Interno (mm)	Espessura da parede (mm)	Material
Plasnova Ind. Com. Ltda.	15,759	0,996	Polietileno com tratamento UV

A vazão escoada no tubo foi determinada por um medidor magnético indutivo de 1", calibrado, com precisão de 0,5%, instalado no início da tubulação. No final do tubo de polietileno, foi instalado, sequencialmente, um tubo flexível de 1", válvula reguladora de pressão e um aspersor. A válvula reguladora foi responsável por manter constante a pressão na base do aspersor e, conseqüentemente, assegurar descarga constante. Variando o bocal do aspersor, foi possível ensaiar vazões equivalentes às velocidades de aproximadamente 1,0; 1,5 e 2,0  $m s^{-1}$ . Para cada vazão, avaliaram-se 3 amostras do tubo de polietileno, sob 9 pressões de operação. Após a obtenção da perda contínua de carga experimental, efetuaram-se cálculos para a determinação deste mesmo parâmetro, empregando as principais equações recomendadas pela literatura para tubos de polietileno: a) equação de Darcy-Weisbach, com  $f$  calculado pela equação de Blasius (BERNARDO et al., 2006; CLARK et al., 2007; RETTORE NETO et al., 2009a), considerando  $c = 0,296$  (RETTORE NETO et al., 2009a); b) equação de Hazen-Williams, considerando  $C = 144$  (BERNARDO, 1995), c) equação de Flamant (CLARK et al., 2007).

Para a determinação da perda contínua de carga nos tubos utilizados, não foi possível utilizar conexões disponíveis no mercado, por serem instaladas no interior dos tubos, aumentando, assim, a perda de carga. Portanto, utilizou-se a metodologia proposta por GOMES et al. (2010), que empregaram uma conexão para envolver o tubo de polietileno, sendo que se utilizou anel de silicone para a realização da vedação entre a conexão e o tubo (Figura 1C).

A estrutura utilizada para a realização dos ensaios foi composta de: (A) Equipamentos: 1 medidor de vazão; 2-válvula de diafragma; 3-manômetro diferencial, e 4-manômetros digital; (B) Tubo de polietileno; (C) e (D) Conexão de PVC (Figura 1).

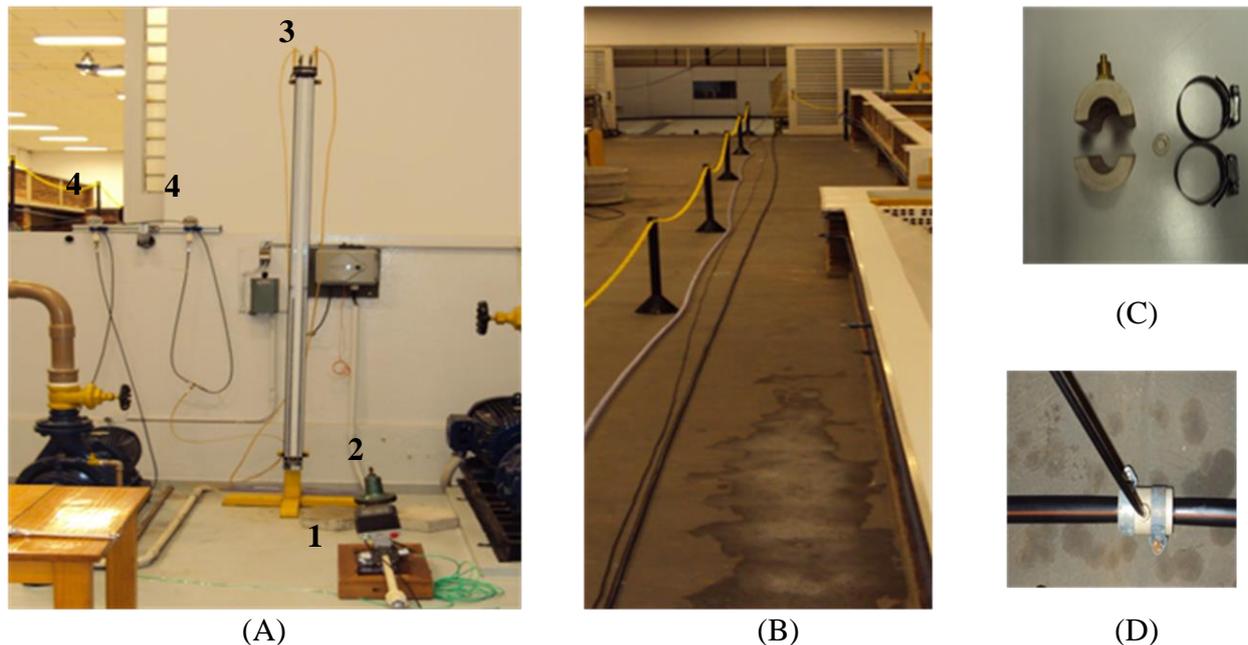


FIGURA 1. Estrutura utilizada no ensaio. **Structure used to perform the tests.**

Para quantificar a perda de carga, utilizou-se um manômetro diferencial em “U” com coluna de vidro, e escala com precisão de mm (1.000 – 0 – 1.000) e líquido manométrico com massa específica de  $13.600 \text{ kg m}^{-3}$ .

A perda contínua de carga foi determinada em segmentos de tubos de polietileno de 40 m, retirados de uma bobina de 500 m, sendo a primeira amostra retirada da parte inicial, a segunda da parte central e a terceira da parte final da mesma. Os tubos ensaiados foram dispostos no laboratório de forma que ficassem em nível em todo o seu comprimento.

Para o monitoramento da pressão no tubo, utilizaram-se dois manômetros digitais calibrados, com precisão de 0,25 %, instalados no início e no final do tubo.

Durante os ensaios, foi monitorada a temperatura da água, que variou entre 26 e 27 °C, sendo utilizada para corrigir a viscosidade cinemática da água nos cálculos da perda de carga.

Construiu-se uma bancada de ensaio para pressurização em regime estático do fluido, que facilitou o controle, o monitoramento e a aquisição dos dados necessários para o desenvolvimento do trabalho (Figura 2).

O diâmetro externo dos tubos pressurizados, em regime estático, foi determinado empregando-se um micrômetro de varredura a laser, modelo LSM 503S (Figura 2A). Para a determinação da alteração do diâmetro, as amostras de tubo foram pressurizadas de 0,0 a 588,4 kPa, com incrementos de 49,05 kPa, totalizando 12 pontos de medição. Para cada amostra de tubo pressurizada, foram efetuadas três leituras, sendo a primeira realizada a 0,25 m da extremidade ( $L_1$ ), a segunda a 0,5 m ( $L_2$ ) e a terceira a 0,75 m ( $L_3$ ). Devido às amostras dos tubos não serem perfeitamente circulares, foram realizadas medidas com o “scanner” na posição horizontal ( $D_1$ ) e na posição vertical ( $D_2$ ). A Figura 2 ilustra os procedimentos utilizados.

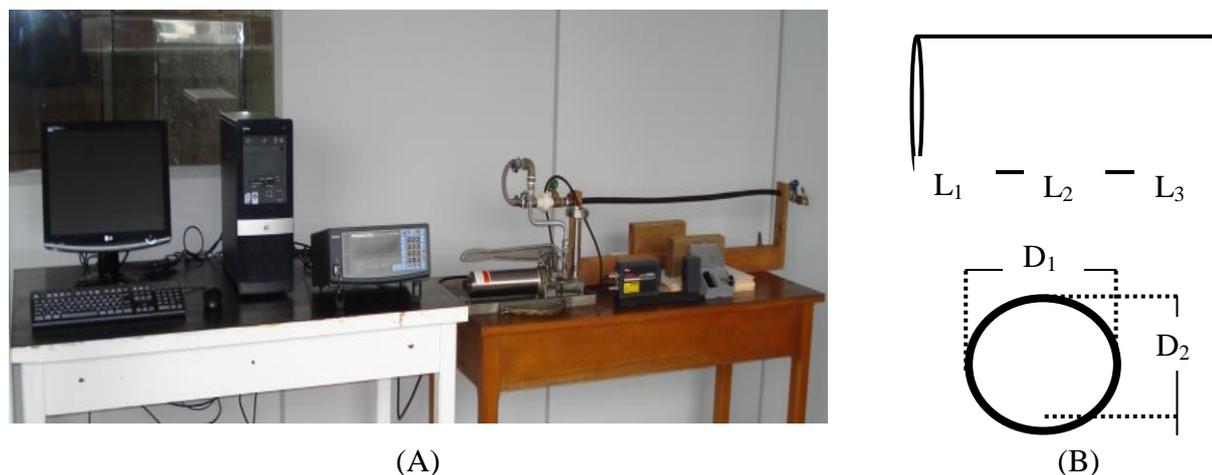


FIGURA 2. Banca de ensaio (A) e Esquema de leitura do “scanner” a laser (B). **Test bench (A) and Read layout of the laser scanner (B).**

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A vazão média e o coeficiente de variação de vazão para cada amostra, resultante das nove pressões avaliadas em 3 velocidades médias de escoamento, estão apresentados na Tabela 2.

O coeficiente de variação reflete, em parte, a imperfeição do mecanismo de operação da válvula reguladora de pressão e, conseqüentemente, a instabilidade na vazão, sendo todos os valores obtidos considerados aceitáveis.

TABELA 2. Vazão média e coeficiente de variação de vazão, resultante das nove pressões avaliadas, para as 3 amostras avaliadas e 3 velocidades médias. **Average discharge and flow variation coefficient, resulting from nine pressures evaluated, for 3 evaluated samples and 3 average speeds.**

Amostra	Velocidade média (m s <sup>-1</sup> )					
	1,06		1,57		1,87	
	Vazão (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	CV (%)	Vazão (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	CV (%)	Vazão (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	CV (%)
1	0,751	1,69	1,115	1,93	1,332	1,07
2	0,749	2,80	1,101	1,65	1,312	1,68
3	0,739	1,10	1,094	0,37	1,300	0,90

Na FIGURA está apresentada a perda contínua de carga observada em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pelas equações de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Flamant, considerando: 9 pressões de ensaio (196,1; 245,2; 294,2; 343,2; 392,3; 441,3; 492,4; 339,4 e 588,4 kPa); vazões correspondentes às velocidades de referência de 1,06; 1,57 e 1,87 m s<sup>-1</sup>.

Em todas as condições avaliadas, as 3 equações de Darcy-Weisbach - DW, Hazen-Williams - HW e Flamant - Fl superestimam a perda contínua de carga, quando aplicadas ao cálculo desta variável, em tubos de polietileno. Os melhores ajustes foram observados para as equações de DW, HW e Fl, respectivamente. Houve redução na perda de carga, com o aumento da pressão de funcionamento, resultando em elevação do erro das equações em relação aos dados obtidos na determinação de perda de carga.

ANDRADE (1990), estudando as características hidráulicas de um tubo de polietileno perfurado, com espessura de parede de 200 μm, verificou, para um acréscimo de pressão de 90%, dentro da faixa de operação recomendada pelo fabricante, um aumento de 10,67% no diâmetro interno da tubulação. Considerando que, para uma vazão constante, a perda de carga é inversamente proporcional à quinta potência do diâmetro do tubo, os acréscimos máximos de diâmetros ocasionados pelo aumento da pressão, verificados no experimento de ANDRADE (1990),

reduziram a perda de carga em 31 de 15 %, chegando até a 60,24%, o que poderia alterar, sensivelmente, as condições hidráulicas e elétricas de um projeto de irrigação localizada.

O acréscimo no diâmetro do tubo de polietileno, em função da pressão de operação, também foi observado por FRIZZONE et al. (1998), ao analisar um tubo gotejador com paredes de 225 µm de espessura.

Estes comportamentos são resultantes do aumento no diâmetro dos tubos com a elevação da pressão de operação. VILELA et al. (2003), ao avaliarem tubos de polietileno com espessuras de paredes de 1.325 µm e 1.050 µm, observaram influência significativa da pressão de operação no diâmetro dos tubos e relataram que estas alterações podem ocasionar variações superiores a 20 % na determinação da perda de carga.

RETTORE NETO (2011) relata que perda contínua de carga observada em laboratório para tubo de polietileno, operando na faixa de 147,1 a 588,4 kPa, foi menor que a estimada pela equação de Darcy-Weisbach. Tal comportamento está relacionado com a elasticidade (aumenta-se o diâmetro interno com o aumento da pressão) do material, afetando a determinação da perda contínua de carga.

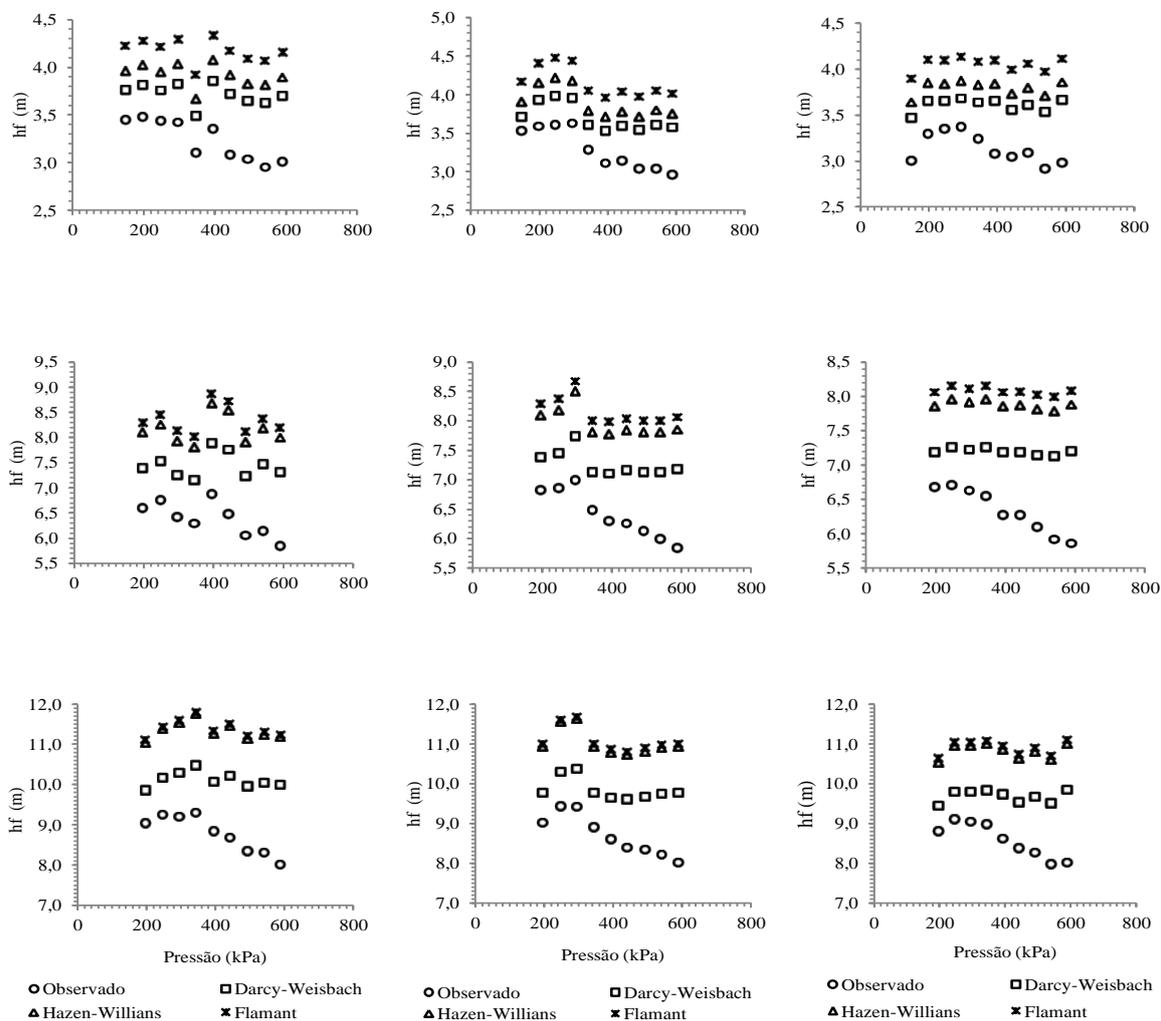


FIGURA 3. Representação gráfica da perda contínua de carga (observada e calculada) em função da pressão, para as 3 amostras (A1, A2 e A3), nas 3 velocidades de referência ( $V_1 = 1,06 \text{ m s}^{-1}$ ;  $V_2 = 1,57 \text{ m s}^{-1}$  e  $V_3 = 1,87 \text{ m s}^{-1}$ ). **Graphical representation of continuous head loss (observed and calculated) in function of pressure for 3 evaluated samples (A1, A2 and A3), under 3 reference speeds ( $S_1 = 1.06 \text{ m s}^{-1}$ ,  $S_2 = 1.57 \text{ m s}^{-1}$  and  $S_3 = 1.87 \text{ m s}^{-1}$ ).**

Os modelos utilizados para o cálculo da perda contínua de carga consideram o diâmetro interno da tubulação constante. Para o tubo de polietileno, verificou-se que o diâmetro externo variou com o acréscimo da pressão (Tabela 3). A alteração do diâmetro externo indica que há variação do diâmetro interno, resultando na imprecisão da estimativa da perda contínua de carga.

TABELA 3. Diâmetro médio externo observado em função da pressão de entrada. **Variation of extern diameter observed in function of pressure.**

Pressão (kPa)	Diâmetro externo (mm)	Pressão (kPa)	Diâmetro externo (mm)
0,0	17,64	343,2	17,94
98,1	17,73	392,3	17,98
147,1	17,77	441,3	18,02
196,1	17,81	490,4	18,06
245,2	17,85	539,4	18,10
294,2	17,89	588,4	18,14

Na TABELA 4, consta o erro de estimativa das equações de Darcy Weisbach, Hazen-Williams e Flamant, quando utilizadas para calcular a perda contínua de carga em tubo de polietileno. Observou-se que, para a faixa de pressão de 147,1 a 392,3 kPa, as estimativas foram superiores aos valores observados, sendo que, com o aumento da pressão, o erro também aumentou. Assim, verifica-se que, para tubos de polietileno, a pressão afeta a determinação da perda contínua de carga.

TABELA 4. Erros na determinação da perda de carga em tubos de polietileno, devido ao incremento na pressão de funcionamento, utilizando a Equação de Darcy-Weisbach (DW), Hazen-Williams (HW) e Flamant (FL). **Errors on determining continuous head loss of polyethylene pipes due to inlet pressure increment, using the equations of Darcy-Weisbach (DW), Hazen-Williams (HW) and Flamant (FL).**

Pressão (kPa)	Velocidade média								
	1,06 m s <sup>-1</sup>			1,56 m s <sup>-1</sup>			1,87 m s <sup>-1</sup>		
	DW	HW	Fl	DW	HW	Fl	DW	HW	Fl
147,1	10%	16%	23%	---	---	---	---	---	---
196,1	10%	16%	23%	9%	20%	23%	8%	21%	22%
245,2	10%	15%	23%	10%	20%	23%	9%	22%	23%
294,2	10%	16%	23%	11%	21%	24%	10%	23%	24%
343,2	12%	17%	25%	11%	22%	25%	11%	24%	24%
392,3	16%	22%	30%	14%	25%	28%	13%	26%	27%

## CONCLUSÕES

A pressão de operação afeta a perda contínua de carga no tubo de polietileno estudado. As equações de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Flamant não estimam com exatidão a perda contínua de carga no tubo de polietileno estudado.

## AGRADECIMENTOS

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), 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). À Plasnova Louveira Indústria e Comércio Ltda.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D. V. *Avaliação hidráulica de tubos flexíveis de polietileno perfurados a laser, utilizados na irrigação*. 1990. 147 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. *Manual de hidráulica*. 7 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 336p.
- 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.
- CLARK, G. A.; HAMAN, D. Z.; PROCHASKA, J. F.; YITAYEW, M. General system design principles. In: LAMN, F.R.; AYARS, J.; NAKAYAMA, F. S. *Microirrigation for crop production: Design, Operation, and management*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2007. cap.5, p.161-220.
- BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. 6 ed. Viçosa: Editora UFV, 1995. 657 p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. *Manual de Irrigação*. 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625 p.
- BERNUTH, R. D von. 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.
- 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*, Jaboticabal, v.30, n.3, p.435-446, 2010.
- FRIZZONE, J. A.; VIEIRA, A. T.; PAZ, V. P. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, 1998.
- PORTO, R. M. *hidráulica básica*. 4 ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540 p.
- RETTORRE NETO, O. *Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos*. 2011.95 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2011.
- RETTORRE NETO, O.; FRIZZONE, J. A.; MIRANDA, J. H.; BOTREL, T. A. Perda de carga localizadas em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.1, p.28-39, 2009a.
- RETTORRE NETO, O.; MIRANDA, J.H.; FRIZZONE, J. A.; WORKMAN, S. R. Local head loss of non-coaxial emitters inserted in polyethylene pipe. *Transactions of the ASABE*, New York, v.53, n.3 p. 729-738, 2009b.
- SILVA, L. G.; MANTOVANII, E. C.; RAMOS, M. M. Irrigação Localizada. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. *Irrigação. Piracicaba: SBEA*, 2003. v.2, cap. 12, p.259-309 (Série Engenharia Agrícola).
- SONNAD, J. R.; GOUDAR, C. T. Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-Whithe equation. *Journal of Hydraulics Engineering*, New York, v. 132, n.8, p. 863-867, 2006.
- VALIANTZAS, J. D. Explicit Power formula for the Darcy-Weisbach pipe flow equation: Application in optimal pipeline design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.134, n.4, p.454-461, 2008.
- 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.

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.