

IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO. II — CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LINHAS LATERAIS DE IRRIGAÇÃO COM MICROGOTEJADOR IRTEC ^{1/}

Manoel Alves de Faria ^{2/}

Salassier Bernardo ^{3/}

Paulo Afonso Ferreira ^{3/}

Blamor Torres Loureiro ^{3/}

1. INTRODUÇÃO

As linhas laterais de irrigação por gotejamento, ou linhas de emissores, apresentam gotejadores ou saídas espaçados uns dos outros de acordo com o tipo de solo e com a cultura que vai ser irrigada. A uniformidade de aplicação de água ao longo dessa linha está intimamente relacionada com a variação na vazão dos gotejadores, devida às perdas de energia da água por atrito ao longo do tubo e nas inserções dos gotejadores, aos ganhos ou perdas de energia de posição e à qualidade da matéria-prima e dos processos de fabricação.

Com a ocorrência de regimes de escoamento laminar, instável e turbulento numa linha lateral de irrigação por gotejamento, a determinação da perda de carga requer bastante cuidado, visto que essa linha, geralmente, trabalha com a pressão relativamente baixa e que a perda de carga admissível pressupõe controle mais rígido do dimensionamento hidráulico do sistema.

^{1/} Parte da tese apresentada, pelo primeiro autor, à U.F.V., como parte das exigências para obtenção do grau de «Magister Scientiae» em Engenharia Agrícola.

Recebido para publicação em 4-12-1981.

^{2/} Departamento de Engenharia Rural da ESAL 37200 Lavras, MG.

^{3/} Departamento de Engenharia Agrícola da U.F.V. 36570 Viçosa, MG.

Diversas fórmulas são disponíveis para o dimensionamento das tubulações laterais de gotejo. Por causa de sua simplicidade, a equação de Hazen-Williams é amplamente usada na indústria de irrigação para calcular as perdas por atrito em tubos de irrigação. Esse uso tem sido estendido para linhas laterais de irrigação por gotejamento, ainda que tais linhas, geralmente, tenham diâmetros menores e vazões mais baixas que outras situações de irrigação.

Diferentes valores do coeficiente de rugosidade (C) da equação de Hazen-Williams são apresentados para tubo de polietileno liso. HOWELL e HILER (7) obtiveram C igual a 130 para tubo com diâmetro interno de 15,8 mm e C igual a 128 para tubo Drip-eze DH 580 com diâmetro interno de 14,7 mm. OLIVEIRA (9) obteve valor médio de C igual a 144 para tubos de polietileno marca CIPLA, com diâmetros internos de 12,7 mm, 14,4 mm e 14,8 mm. KELLER e KARMELI (8) apresentam gráficos de perda de carga no tubo, calculada com C igual a 150, e comentam que o valor de C pode variar de 80 a 140, pela presença dos gotejadores na lateral. HANSON (5) obteve valores de C de 98 a 136 para tubos com diferentes tipos de gotejadores, espaçados de 1,5 m. ASSY (1) verificou que, para condutos hidraulicamente lisos, o valor de C é constante e igual a 158 apenas para número de Reynolds acima de 500.000; nos demais casos, relaciona-se com o número de Reynolds e com a rugosidade relativa.

BEZDEK e SOLOMON (2) citam que estudos feitos por Urbina e Paraqueima mostraram que, não obstante seja o valor de C selecionado para uso da equação de Hazen-Williams, a equação de Darcy-Weisbach é mais precisa para calcular as perdas de carga em tubos de plásticos com pequeno diâmetro, usados nas laterais de irrigação por gotejamento.

A equação de Darcy-Weisbach pode ser utilizada tanto para o regime laminar como para o regime turbulento. Para o regime de escoamento laminar, o fator de atrito (f) dessa equação é $f = 64/Re$. Para regime de escoamento turbulento ($4500 < Re < 100.000$), WU e GITLIN (10) citam que f pode ser obtido pela equação de Blasius, em que $f = 0,3164 Re^{-0,25}$.

Uma das maneiras de determinar a perda de energia que realmente ocorre no tubo e nos gotejadores é computar a variação de pressão entre duas saídas adjacentes, adicionando-a à que ocorre no ponto de inserção do gotejador. Esse cálculo é feito do final para o início da linha e requer muito trabalho, caso não se disponha de um computador. Para evitar isso, o mesmo tipo de solução encontrado por CHRISTIANSEN (3) para a linha lateral de irrigação por aspersão tem sido proposto para facilitar o cálculo de linhas laterais de irrigação por gotejamento. No entanto, HOWELL e HILER (7) e OLIVEIRA (9) observaram que os valores do coeficiente de redução de perda de carga (F), para condição de escoamento em regime turbulento, aumentam, para o mesmo número de gotejadores, quando se diminuem os espaçamentos entre eles. Observaram ainda que, quando se utilizam gotejadores instalados «em linha», o valor de F deve ser determinado com bastante cuidado, para não se incorrer em graves erros na elaboração do projeto hidráulico, visto que as perdas localizadas são grandes ou, mesmo, maiores que as perdas por atrito na seção da linha entre dois gotejadores.

Este trabalho teve como objetivo estudar a perda de carga na linha lateral de irrigação, como também estabelecer os valores do coeficiente de redução de perda de carga, F (Christiansen), e determinar o número máximo de microgotejadores por linha lateral.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

Foi estudada uma linha lateral de irrigação, constituída de 30 m de tubo de polietileno preto, marca CIPLA (tipo popular), com diâmetro interno de 14,9 mm, no qual foram instalados 10 gotejadores de vazão constante sob pressão variável, fabricados pela IRTEC, espaçados de 3 m entre si.

Determinaram-se a perda de carga ao longo do tubo, com e sem microgotejadores, e a perda de carga localizada na inserção do microgotejador. Nesses testes utilizou-se a metodologia descrita por OLIVEIRA (9).

Estudaram-se as perdas de carga relacionadas com as vazões aplicadas na linha de teste, com e sem microgotejadores, utilizando um modelo de regressão não-linear, representado pela seguinte expressão:

$$H_f = a \cdot Q^b \quad \text{eq. (1)}$$

em que H_f é a perda de carga no tubo ou perda de carga no tubo com microgotejadores vedados, em m.c.a.; Q é a vazão, em m^3/s ; a é a constante de regressão, que depende do tubo estudado; b é o coeficiente de regressão, que depende do regime de escoamento.

Para determinar o coeficiente de rugosidade (C) da equação de Hazen-Williams, para o material estudado, utilizou-se a expressão:

$$C = \left(4,34674 \cdot 10^{15} \cdot \frac{Q^{1,852}}{H_f} \cdot d^{-4,87} \right)^{0,54} \quad \text{eq. (2)}$$

em que C é o coeficiente de rugosidade, adimensional, e d é o diâmetro interno do tubo, em mm.

Analisou-se também a equação de Darcy-Weisbach, com o objetivo de determinar uma expressão de forma semelhante à proposta por Blasius, na qual

$$f = 0,3164 \text{ Re}^{-0,25} \quad \text{eq. (3)}$$

sendo f o fator de atrito, adimensional, e Re o número de Reynolds, também adimensional.

Procurou-se especificar a perda de carga ocorrida na inserção do microgotejador, por meio da expressão

$$H_{fg} = K_g \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{eq. (4)}$$

em que H_{fg} é a perda de carga localizada na inserção do microgotejador, em m.c.a.; K_g é o coeficiente de perda de carga localizada do microgotejador, adimensional; V é a velocidade da água, em m/s ; e g é a aceleração da gravidade, em m/s^2 .

Os valores de H_{fg} foram obtidos experimentalmente utilizando a equação

$$H_{fg} = \frac{H_{ftg} - H_{ft}}{10} \quad \text{eq. (5)}$$

em que H_{ftg} é a perda de carga no tubo com microgotejadores, em m.c.a., e H_{ft} é a perda de carga no tubo, em m.c.a.

Os valores de H_{ftg} e H_{ft} foram obtidos com o emprego das equações obtidas por regressão (equação 1).

Determinado o valor de H_{fg} , pela equação 5, K_g pode ser determinado pela

equação 4, que, rearranjada, transforma-se em

$$K_g = \frac{H_{fg} \cdot A^2 \cdot 2g}{Q^2} \quad \text{eq. (6)}$$

em que A é a área da seção transversal do tubo, em m^2 , e Q é a vazão, em m^3/s .

Estudaram-se também os valores dos coeficientes de perda de carga localizada, considerando o número de Reynolds da vazão correspondente, utilizando um modelo polinomial do 2.º grau, representado pela seguinte equação:

$$K_g = a_0 + a_1 Re + a_2 Re^2 \quad \text{eq. (7)}$$

em que a_0 é a constante de regressão e a_1 e a_2 são os coeficientes de regressão.

Para calcular os valores de F (Christiansen), considerando o número de microgotejadores e o espaçamento entre eles, utilizou-se um programa de computador, semelhante ao usado por OLIVEIRA (9). Nesse programa utilizaram-se a equação que fornece o coeficiente de perda de carga localizada na inserção do microgotejador (equação 7), a equação semelhante à de Blasius, gerada experimentalmente, e a equação característica de vazão-pressão do microgotejador, determinada por FARIA (4).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando tubo de polietileno com diâmetro interno de 14,9 mm, foram obtidas as seguintes equações, ajustadas para determinar as perdas de carga no tubo, com e sem microgotejadores, respectivamente:

$$H_{ftg} = 520035,1 \cdot Q^{1,7736} \cdot L \quad \text{eq. (8)}$$

$$H_{ft} = 356446,66 \cdot Q^{1,74368} \cdot L \quad \text{eq. (9)}$$

em que H_{ftg} é a perda de carga no tubo com microgotejadores vedados, em m.c.a.; H_{ft} é a perda da carga no tubo, em m.c.a.; Q é a vazão, em m^3/s ; e L é o comprimento do tubo, em m.

As equações 8 e 9 foram obtidas com coeficientes de determinação de 0,9999 e 0,9997, respectivamente, e testes de F significativos ao nível de 1% de probabilidade.

O expoente de Q , na equação 9, aproxima-se do valor 1,75, que é o expoente da vazão na equação de Darcy-Weisbach, sendo o fator de atrito calculado pela fórmula da Blasius, caracterizando-se, portanto, o regime de escoamento turbulento na linha.

A representação gráfica das equações 8 e 9 pode ser vista na Figura 1. Por essa figura verifica-se que a perda de carga na tubulação cresce com a vazão e que a perda de carga no tubo com microgotejadores vedados é sempre maior que a perda de carga no tubo. Isso se deve às perdas adicionais provocadas pela inserção do microgotejador na linha.

Para menores valores de vazão, a curva de perda de carga no tubo com microgotejadores vedados aproxima-se da curva de perda de carga no tubo. Tal fato se verifica porque, para vazões menores, a velocidade da água no tubo também é me-

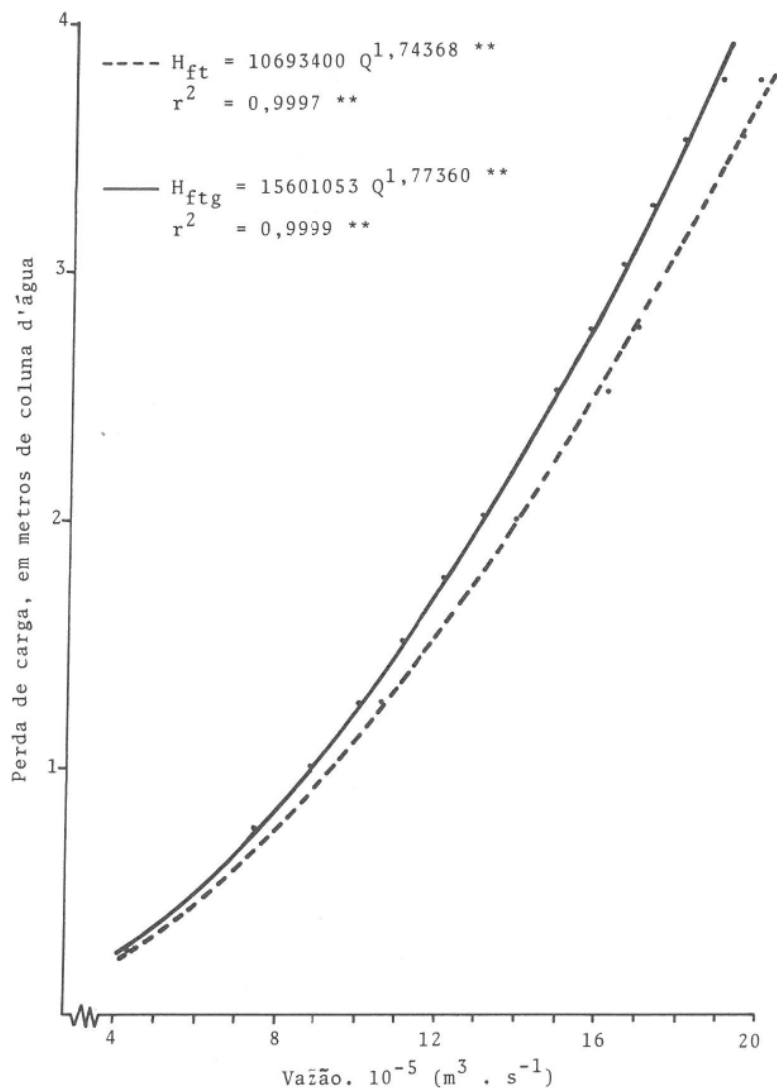


FIGURA 1 - Perda de carga no tubo (H_{ft}) e no tubo com microgotejadores vedados (H_{ftg})

** Significativo, ao nível de 1% de probabilidade.

nor e, conseqüentemente, menor será a perda de carga na inserção dos microgotejadores.

A partir dos dados de perda de carga no tubo e de perda de carga no tubo com microgotejadores vedados, determinou-se, pela equação 2, o valor do coeficiente de rugosidade (C) da equação de Hazen-Williams. Tais valores encontram-se nos Quadros 1 e 2, respectivamente, e mostram que, em ambos os casos, C variou de acordo com a vazão utilizada na linha, o que está de acordo com os resultados obtidos por OLIVEIRA (9) e por ASSY (1).

QUADRO 1 - Valores do coeficiente de rugosidade (C) da equação Hazen-Williams, para o tubo estudado, obtidos pela equação 2*

Número da observação	Vazão (m ³ /s)	Valores de C
01	4,18.10 ⁻⁵	126
02	6,36.10 ⁻⁵	132
03	7,91.10 ⁻⁵	132
04	9,39.10 ⁻⁵	134
05	10,60.10 ⁻⁵	134
06	11,85.10 ⁻⁵	136
07	12,90.10 ⁻⁵	136
08	13,83.10 ⁻⁵	136
09	14,81.10 ⁻⁵	136
10	16,04.10 ⁻⁵	140
11	16,74.10 ⁻⁵	138
12	17,50.10 ⁻⁵	138
13	18,33.10 ⁻⁵	138
14	19,25.10 ⁻⁵	140
15	19,74.10 ⁻⁵	138

Valor médio de C = 136

* Usou-se o diâmetro real do tubo (14,9 mm).

Com os dados de vazões e perdas de carga obtidos na linha de teste antes da inserção dos microgotejadores estabeleceu-se, por meio da análise de regressão, a seguinte expressão:

$$f = 0,34318 \cdot Re^{-0,25632} \quad \text{eq. (10)}$$

em que f é o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach e Re é o número de Reynolds, adimensional.

A equação 10 foi obtida com coeficiente de determinação igual a 0,9884 e teste de F significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Observa-se que essa equação aproxima-se bastante da equação 3, estabelecida por Blasius para o regime turbulento.

Com os dados de K_g (Quadro 3), calculados pela equação 6, obteve-se, por meio de análise de regressão, a seguinte equação:

$$K_g = 0,634697 + 1,50907 \cdot 10^{-5} Re - 5,40367 \cdot 10^{-10} Re^2 \quad \text{eq. (11)}$$

QUADRO 2 - Valores do coeficiente de rugosidade (C) da equação de Hazen-Williams, para tubo com microgotejadores vedados, obtidos pela equação 2*

Número da observação	Vazão (m ³ /s)	Valores de C
01	4,06.10 ⁻⁵	123
02	5,97.10 ⁻⁵	124
03	7,50.10 ⁻⁵	125
04	8,85.10 ⁻⁵	126
05	10,00.10 ⁻⁵	127
06	11,05.10 ⁻⁵	127
07	12,09.10 ⁻⁵	128
08	13,05.10 ⁻⁵	128
09	14,00.10 ⁻⁵	129
10	14,81.10 ⁻⁵	129
11	15,71.10 ⁻⁵	130
12	16,38.10 ⁻⁵	129
13	17,11.10 ⁻⁵	129
14	17,91.10 ⁻⁵	130
15	18,78.10 ⁻⁵	131
16	19,25.10 ⁻⁵	130

Valor médio de C = 128

* Usou-se o diâmetro real do tubo (14,9 mm).

A equação 11 foi obtida com coeficiente de determinação igual a 0,9763 e teste de F significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Verificou-se que K_g cresceu com o aumento do número de Reynolds, o que difere do resultado obtido por OLIVEIRA (9) e por HAUGH e BOWERS (6), provavelmente pelo fato de o gotejador estudado reduzir, em grande parte, a seção de escoamento no tubo, quando este é nele inserido, causando, com isso, maior perda de carga localizada que a verificada nos gotejadores e conexões estudados pelos autores anteriormente citados.

Para a determinação do coeficiente de redução de perda de carga, F (Christiansen), considerou-se linha lateral em nível e com carga de pressão equivalente a 10 m.c.a. no último microgotejador. Esse cálculo foi feito para uma variação na vazão, entre o primeiro e o último microgotejador da linha, de 10%, no máximo.

Para calcular os valores de F, apresentados no Quadro 4, utilizou-se a equação de Darcy-Weisbach, tendo em vista a determinação da perda de carga no tubo, considerando escoamento em regime turbulento em toda a linha.

Analisando o Quadro 4, verifica-se que, para um mesmo número de microgotejadores na linha, o valor de F cresce quando diminui o espaçamento entre eles. Tal comportamento está de acordo com os resultados dos trabalhos de HOWELL e HILER (7) e de OLIVEIRA (9).

Pelo Quadro 4 verifica-se também que o valor de F decresceu a partir da unidade até em torno de 30 microgotejadores na linha, crescendo daí em diante, em decorrência da maior perda de carga localizada na inserção do microgotejador, resultante do aumento da vazão na linha.

QUADRO 3 - Valores dos coeficientes de perda de carga localizada (K), obtidos por meio da equação 6*, para o microgotejador estudado

Vazão (m ³ /s)	Re**	K_g
5,0 . 10 ⁻⁵	4341	0,685
6,0 . 10 ⁻⁵	5210	0,699
7,0 . 10 ⁻⁵	6078	0,709
8,0 . 10 ⁻⁵	6947	0,716
9,0 . 10 ⁻⁵	7815	0,722
10,0 . 10 ⁻⁵	8684	0,727
11,0 . 10 ⁻⁵	9553	0,730
12,0 . 10 ⁻⁵	10421	0,733
13,0 . 10 ⁻⁵	11290	0,735
14,0 . 10 ⁻⁵	12158	0,736
15,0 . 10 ⁻⁵	13027	0,737
16,0 . 10 ⁻⁵	13895	0,738
17,0 . 10 ⁻⁵	14764	0,739
18,0 . 10 ⁻⁵	15631	0,739
19,0 . 10 ⁻⁵	16500	0,740

* Usou-se o diâmetro real do tubo (14,9 mm).

** Re foi determinado para temperatura da água de 21,1°C.

No Quadro 4, o último número de cada coluna, correspondente aos espaçamentos, representa o valor de F para o número máximo de microgotejadores por linha, para uma variação na vazão, entre o primeiro e o último microgotejador, de 10%, no máximo.

4. RESUMO

Foram estudadas, no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa, as características hidráulicas de linhas laterais de irrigação por gotejamento que utilizam o microgotejador IRTEC.

Determinaram-se valores do coeficiente de rugosidade (C) da equação de Hazen-Williams; uma equação para determinação do fator de atrito (f) da equação de Darcy-Weisbach, em condição de escoamento em regime turbulento na linha, e uma equação para determinação do coeficiente de perda de carga localizada na inserção do microgotejador (K_g), considerando o número de Reynolds. Observou-se que o valor de C variou com a vazão e com a presença do microgotejador na linha; que K_g apresentou relação direta com o aumento da vazão na linha; que os valores do coeficiente de redução de perda de carga (F) de Christiansen variaram com o número e espaçamento dos microgotejadores e que o número máximo de microgotejadores por linha, para uma variação máxima de 10% na vazão dos microgotejadores, variou de 180 a 90, para os espaçamentos de 1,0 e 8,0 metros, respectivamente.

QUADRO 4 - Valores da vazão média e do coeficiente de redução (F), para dimensionamento de linhas laterais, considerando o número e espaçamento entre microgotejadores*

Nº de mi- crogote- jadores	Vazão média (l/h)	Espaçamento entre os microgotejadores							
		1,0 m	2,0 m	3,0 m	4,0 m	5,0 m	6,0 m	7,0 m	8,0 m
01	4,57	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
02	4,57	0,718	0,684	0,672	0,667	0,663	0,661	0,659	0,658
03	4,57	0,610	0,579	0,572	0,563	0,560	0,557	0,556	0,555
04	4,57	0,560	0,529	0,519	0,514	0,511	0,509	0,507	0,506
05	4,57	0,532	0,501	0,491	0,486	0,483	0,480	0,479	0,478
06	4,57	0,514	0,483	0,472	0,467	0,464	0,462	0,461	0,460
07	4,57	0,502	0,470	0,460	0,454	0,451	0,449	0,448	0,447
08	4,57	0,493	0,461	0,450	0,445	0,442	0,440	0,438	0,437
09	4,57	0,486	0,454	0,443	0,438	0,435	0,433	0,431	0,430
10	4,57	0,481	0,448	0,438	0,432	0,429	0,427	0,425	0,424
20	4,57	0,464	0,427	0,414	0,408	0,405	0,402	0,400	0,399
30	4,57	0,452	0,422	0,408	0,402	0,398	0,395	0,393	0,392
40	4,57	0,442	0,421	0,406	0,399	0,395	0,392	0,390	0,388
50	4,56	0,468	0,421	0,406	0,398	0,394	0,391	0,389	0,387
60	4,56	0,471	0,422	0,406	0,398	0,394	0,391	0,389	0,387
70	4,56	0,475	0,424	0,407	0,399	0,394	0,391	0,389	0,387
80	4,54	0,479	0,425	0,408	0,400	0,395	0,391	0,389	0,388
90	4,53	0,482	0,427	0,410	0,401	0,396	0,392	0,390	0,388
100	4,52	0,486	0,430	0,413	0,403	0,397	0,392	0,390	0,388
110	4,52	0,489	0,432	0,415	0,403	0,397	0,392	0,390	0,388
120	4,52	0,493	0,435	0,417	0,403	0,397	0,392	0,390	0,388
130	4,52	0,496	0,436	0,419	0,403	0,397	0,392	0,390	0,388
140	4,52	0,499	0,436	0,420	0,403	0,397	0,392	0,390	0,388
150	4,51	0,502	0,437	0,421	0,403	0,397	0,392	0,390	0,388
160	4,51	0,504	0,437	0,421	0,403	0,397	0,392	0,390	0,388
170	4,51	0,505	-	-	-	-	-	-	-
180	4,50	0,507	-	-	-	-	-	-	-

OBS.: - No cálculo de Hft empregou-se a equação de Darcy-Weisbach, considerando escoamento em regime turbulento em toda a linha.

- Considerou-se $H_{fg} = K_g \cdot V^2/2g$.

- O cálculo de F foi feito para $\Delta q \leq 10\%$.

5. SUMMARY

At the Hydraulics Laboratory of the Federal University of Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brazil, a study was conducted to determine the hydraulic characteristics of lateral irrigation lines for a drip irrigation system using the micro-drip IRTEC.

Equations to calculate head loss in polyethylene tubes were derived. The friction coefficients of Hazen-Williams (C) and of Darcy-Weisbach (f) were determined, as were the values of Christiansen's coefficient (F) and the maximum number of drips that can be used per line.

6. LITERATURA CITADA

1. ASSY, T. M. *O emprego da fórmula universal de perda de carga e as limitações das fórmulas empíricas*. São Paulo, CETESB, 64 p. 1977.
2. BEZDEK, J. C. & SOLOMON, K. Approximating friction factors for trickle tubing. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 104 (IR4):351-359, 1978.
3. CHRISTIANSEN, J.E. *Irrigation by Sprinkling*. Berkeley, California Agricultural Station, 1942. 124 p. (Bul. 670).
4. FARIA, M.A. *Características hidráulicas do microgotejador IRTEC e da linha lateral de irrigação*. Viçosa, U.F.V., Imprensa Universitária, 1981. 78 p. (Tese M.S.).
5. HANSON, G.R. *Hydraulics of trickle irrigation emitter lines*. Logan, Utah State University, 1973. 94 p. (Tese M.S.).
6. HAUGH, C. G. & BOWERS, W. Pressure losses in plastic tubing and fittings. *Agricultural Engineering*, 43(1):26-29, 1962.
7. HOWELL, T. A. & HILER, E.A. Trickle irrigation lateral design. *Transactions of the ASAE*, 17(5):902-908. 1974.
8. KELLER, J. & KARMELI, D. *Trickle irrigation design*. California, Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133 p.
9. OLIVEIRA, C.A.S. *Hidráulica de gotejadores e de linhas laterais para irrigação por gotejamento*. Viçosa, U.F.V. Imprensa Universitária, 1978. 72 p. (Tese M.S.).
10. WU, I. P. & GITLIN, H. M. Drip irrigation design based on uniformity. *Transactions of the ASAE*, 17 (3):429-432, 1974.