

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Perda localizada de carga em gotejadores integrados em tubos de
polietileno**

Anthony Wellington Almeida Gomes

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

**Piracicaba
2009**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Anthony Wellington Almeida Gomes
Engenheiro Agrícola

Perda localizada de carga em gotejadores integrados em tubos de polietileno

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

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

**Piracicaba
2009**

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

Gomes, Anthony Wellington Almeida

Perda localizada de carga em gotejadores integrados em tubos de polietileno / Anthony Wellington Almeida Gomes. - - Piracicaba, 2009.
61 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2009.
Bibliografia.

1. Irrigação por gotejamento 2. Perda de carga 3. Tubos I. Título

CDD 631.7
G633p

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

Dedico este trabalho:

Aos meus pais, **Wilson Gomes da Silva** e **Gedalva Almeida Gomes**, que me permitiram estar aqui experimentando o poder de superação, ao estar distante; gostaria de expressar a enorme paixão que sinto por eles e, através deste trabalho e de muitos que virão, deixar eternizado o meu amor a essas duas pessoas;

Aos meus avós por parte de pai, **Manoel Gomes da Silva** e **Maria Luiza da Silva**, também dedico este trabalho. Sei que, em forma espiritual, eles me propuseram essa conquista através da formação sólida, honesta e de respeito que proporcionaram ao meu pai. (*In memoriam*);

Aos meus avós por parte de mãe, **Olívio de Almeida** e **Josefa de Jesus Almeida**, venho aqui expressar o mesmo carinho que sempre tive enquanto estava ao seu lado. É com grande satisfação que também coloco os nomes deles para serem eternizados neste trabalho, por terem dedicado as suas vidas a uma pessoa que amo de coração, a minha mãe (*In memoriam*);

Ao meu irmão **Tony Wilson Almeida Gomes**, que superou algumas dificuldades e hoje é um psicólogo, deixando, tanto a mim como aos meus pais, totalmente orgulhosos pela sua conquista pessoal e profissional;

Ao meu orientador Professor Dr. **José Antônio Frizzone** e sua esposa Professora **Maria Aparecida**, pela compreensão e amizade que demonstraram ter com seus orientandos, principalmente comigo. Sei que ele já recebeu várias dedicatórias pelas suas atividades como bom profissional, mas gostaria de colocar o nome deles junto às pessoas de que gosto e, assim, dizer que são pessoas inesquecíveis em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Pai todo poderoso, Jesus Cristo, e a nossa Mãe Nossa Senhora, por me darem saúde para enfrentar esta caminhada e força nas dificuldades que surgiram durante a elaboração deste trabalho;

À ESALQ/USP, por promover a oportunidade de os alunos estudarem em sua instituição, principalmente ao Departamento de Engenharia Rural por dar condições de realizar o curso de mestrado e, por conseqüência, ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudo;

Aos professores do Departamento de Engenharia Rural, Prof. Dr. Décio Eugênio Cruciani, Prof. Dr. Iran José da Silva, Prof. Dr. Marcos Vinicius Folegatti, Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, Prof. Dr. Sérgio Nascimento Duarte e Prof. Dr. Tarlei Ariel Botrel, que contribuíram de forma significativa para meu crescimento intelectual e pessoal;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, Antonio Agostinho, Beatriz, Sandra, Davilmar, Gilmar e Luis Custódio pela força dada e pela compreensão na realização deste trabalho;

A todos os meus colegas e amigos da Pós-Graduação, em especial a meus amigos Cláudio Uyeda, Valfisio, Allan Cunha, Alexsandro Almeida, Antonio Clarette, Cristian Mendonza (Colômbia), Cleomar, Lucas Gomes, Marcos Rosa, Pedro Robson, Rafael Mingotti, Fábio Rocha, Sílvio Carlos e Jorge Copquer, pois, na hora em que precisei, pude contar com sua ajuda;

A minha madrinha Professora **Margarida Moreira Lima de Souza**, por ser uma das grandes incentivadoras para a realização deste sonho, e ser essa pessoa dedicada à educação em sua vida profissional, te agradeço e deixo o meu muito obrigado;

Ao meu amigo **Oswaldo Rettore Neto**, por sua grande ajuda nas horas mais conflitantes na realização deste trabalho e por seu companheirismo comigo, muito obrigado;

Não poderia de deixar de lembrar o amigão Sr. **Hélio Toledo Gomes**, que, nas horas de dificuldades, estava sempre disposto a me ajudar, através de sua experiência profissional. Agradeço-lhe e o trarei sempre em minhas lembranças;

Àquelas pessoas que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização desta pesquisa, como **Danieli Zitterell** e **Kelly Leite** (estagiárias), o meu muito obrigado.

“Não há um mal que não traga um bem”
(meus avós)

“O que fazemos na vida ecoa na eternidade”
(Autor desconhecido)

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	10
LISTA DE SIMBOLOS.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Irrigação localizada.....	16
2.2 Linha lateral.....	19
2.3 Gotejadores.....	20
2.4 Perdas de carga em linhas laterais de gotejamento.....	23
2.5 Perda de carga nos emissores.....	28
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1 Montagem do experimento e modelos de tubos gotejadores estudados.....	33
3.2 Preparação dos tubos gotejadores.....	37
3.3 Procedimento de perfuração dos tubos (tomada de pressão).....	37
3.4 Instalações das tomadas de pressão.....	38
3.5 Determinação da perda localizada de carga.....	39
3.6 Características geométricas dos tubos gotejadores.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 Perda de carga nos tubos gotejadores.....	45
4.2 Perda localizada de carga nos emissores, em função da vazão.....	46
4.3 Perda localizada de carga nos emissores, em função da carga cinética.....	48
4.4 Coeficiente de carga cinética, em função do índice de obstrução.....	50
4.5 Comprimento equivalente.....	52
4.6 Aplicação.....	54
5 CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS.....	58

RESUMO

Perda localizada de carga em gotejadores integrados em tubos de polietileno

A inserção de gotejadores em uma tubulação modifica as linhas de fluxo, provocando turbulência local, que resulta em perdas de carga adicionais maiores que as perdas contínuas na tubulação. Para avaliar a perda total de carga, ao longo da linha lateral de gotejadores, as perdas contínuas e as localizadas, devidas à presença dos emissores no tubo, devem ser consideradas. Este trabalho apresenta os resultados de um experimento conduzido para avaliar as perdas localizadas de carga em gotejadores coaxiais integrados em tubos de polietileno. A perda de carga para diferentes vazões foi determinada em quatro modelos de tubos gotejadores, com sete repetições. Cada segmento de tubo utilizado continha 11 gotejadores. Para cada vazão, a perda localizada de carga foi calculada pela diferença entre a perda de carga no tubo com emissor e a perda de carga contínua no tubo uniforme, estimada pela equação de Darcy-Weisbach. Aproximações matemáticas foram sugeridas para calcular a perda de carga com base no coeficiente de carga cinética (K) e em um valor constante de comprimento equivalente (L_e). Para cada modelo de tubo gotejador, o coeficiente K foi praticamente independente do número de Reynolds, para $R > 10\ 000$, sugerindo que cada gotejador pode ser caracterizado por um valor médio de K , obtido em função de um índice de obstrução. Em decorrência, propôs-se uma alternativa para calcular a perda localizada de carga, provocada por gotejadores coaxiais integrados a tubos de polietileno, em função de relações geométricas entre a área de escoamento através do gotejador e a da seção do tubo. Os resultados encontrados possibilitam concluir que: (a) maior variabilidade dos valores de K ocorreu para os gotejadores não-autocompensados e a maior perda localizada de carga para os autocompensados; (b) o aumento do grau de obstrução ($1 - A_g/A_t$) proporcionou o aumento na perda localizada de carga. Considerando a vazão de $20 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, nos tubos gotejadores Amanco, observou-se que o aumento de 1,79 vez no grau de obstrução resultou no aumento de 3 vezes na perda localizada de carga; já nos gotejadores Naandan, o aumento de 2,2 vezes no grau de obstrução proporcionou o aumento de 8,9 vezes na perda de carga; (c) a consideração da perda localizada de carga é um critério relevante no dimensionamento de linhas laterais de gotejamento, especialmente quando se utilizam gotejadores autocompensados. A desconsideração da perda localizada de carga levou à superestimativa do comprimento máximo da linha lateral de até 25,7%, para os gotejadores autocompensados, e de 9,5%, para os não-autocompensados; (d) o cálculo da perda localizada de carga, utilizando o modelo potencial para estimar o valor de K em função do índice de obstrução, mostrou bons resultados, comparáveis àqueles obtidos com o valor de K ajustado pelos dados observados em laboratório, o que resultou em pequenas variações na estimativa do comprimento máximo da linha lateral por esses dois procedimentos. Considera-se, assim, que a perda localizada de carga em gotejadores coaxiais, pode ser calculada utilizando-se um coeficiente de carga cinética calculada em função do índice de obstrução.

Palavras-chave: Irrigação por gotejamento; Coeficiente de carga cinética; Perda localizada de carga; Índice de obstrução; Comprimento equivalente

ABSTRACT

Local head losses for integrated drippers in polyethylene pipes

The insert of the drip in a pipe modifies the flow line, causing local turbulence, which results in more additional head loss than the continued loss in pipes. In order to evaluate the local head loss, along the drip irrigation laterals, the continued and localized loss due the presence of these emitters inside the pipes must be considered. This work shows the results of an experiment carried out to evaluate the local head loss in coaxial drippers integrated to polyethylene pipes. The head loss for different discharges was determined using four drip pipe models, using seven repetitions. Each pipe segment contained 11 drips. For each discharge, the local head loss was calculated by the difference between head loss in the pipe with emitters and the continued head loss in the uniform pipe, estimated by Darcy-Weisbach equation. Mathematical approaches were proposed to calculate the head loss based on the kinetic head coefficient (k) and in a equivalent length of pipe constant value (l_e). For each drip pipe model, the k coefficient was considered independent from Reynolds number, $R > 10.000$. It can be concluded that each drip can be characterized by an average k , obtained in function from a obstruction index. As a result, it was proposed an alternative to calculate the local head loss caused by coaxial drip integrated to polyethylene pipes, according to geometric relationship between the flow area through the drip and the pipe section. According to the results can be concluded that: (a) the not self-compensated pressure emitters showed more variability in k values and the self-compensated showed greater local head loss; (b) the obstruction index increase ($1 - a_g/a_t$) caused an increase in the total head loss. Considering a discharge $20 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, it was observed in Amanco drip that a 1,79 times increase in obstruction index, resulting in 3 times the head loss and in Naandan drip, it was observed that 2,2 times increase in obstruction index, resulting in 8,9 times the head loss; (c) the head loss is a relevant criterion in the drip laterals design, especially for self-compensated drips. The disregard of the local head loss resulted in a over-estimate of 25,7% in the maximum length lateral, for self-compensated drips, and until 9,5% for not self-compensated drips; (d) the calculation of the local head loss using the potential model to estimate k value, according to the obstruction index, showed good results when comparing to those obtained using k factor adjusted to the observed data in the laboratory. Resulting in few variations in the maximum length lateral estimation for both procedures. It is considered that the local head loss, caused by the integrated drip on drip lateral, can be calculated using kinetic head coefficient according to obstruction index.

Keywords: Drip irrigation; Kinetic head coefficient; Local head loss; Obstruction index; Equivalent length of straight pipe

LISTA DE SIMBOLOS

A - área de passagem do fluido pelo tubo sem emissor;

A_c - área de passagem do fluido com emissor inserido;

A_t - área do tubo;

A_g - área do emissor;

B – base maior do autocompensador;

b – base menor do autocompensador;

β - coeficiente de ajuste da equação característica de emissores;

c- coeficiente da equação de Blasius;

D - diâmetro do tubo;

D_e - diâmetro externo do emissor;

D_g – diâmetro interno equivalente da seção de escoamento através do gotejador;

e - espessura da parede;

ϵ - altura das rugosidades do tubo;

f - fator de atrito da equação de Darcy- Weisbach;

F - fator de redução de perda de carga;

GO - grau de obstrução;

g - aceleração da gravidade;

H - pressão de operação;

H_s - pressão nominal do emissor;

h - altura do autocompensador;

H_f - perda de carga;

H_{f_L} - perda de carga localizada;

Hfe - perda de carga localizada no emissor;
Hfte - perda de carga no tubo com emissor;
Hft - perda de carga no tubo;
H inicial - pressão na entrada da linha lateral;
H fim - pressão no final da linha lateral;
IO - índice de obstrução;
J - perda de carga unitária do tubo;
J' - perda de carga unitária do tubo com emissores vedados;
K - coeficiente de carga cinética ou de resistência de perfil;
L - comprimento do emissor;
Le - Comprimento equivalente;
Lmáx – comprimento máximo da lateral;
Lvar – variação do comprimento máximo;
Lt - comprimento do tubo;
m - expoente da equação de Blasius;
N - numero de emissores na linha lateral;
 η - viscosidade cinemática da água;
Pm - perímetro molhado;
Q - vazão de escoamento;
q - vazão do emissor;
qn – vazão nominal do emissor;
r - razão de obstrução;
R - número de Reynolds;
Se - espaçamento entre gotejadores;

V_o - velocidade média de aproximação da corrente fluida;

V_c - velocidade de passagem do fluido através do conector;

V - velocidade de passagem do fluido logo após o conector;

x - coeficiente do regime de escoamento do emissor.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil detém uma área irrigada de 3,4 milhões de hectares, sendo 1,8 milhão com sistemas por aspersão e 350,000 ha com sistemas de irrigação localizada (CRISTHOPHIDIS, 2006). A irrigação por gotejamento apresenta alta eficiência de aplicação de água, podendo chegar a 95%, o que significa que até 95 % da água aplicada pode ser utilizada pela cultura, para satisfazer sua demanda hídrica (EVANS; WU e SMAJSTRALA, 2007). Porém existem relatos na literatura de que esse sistema pode ser também muito ineficiente, como resultado de problemas técnicos associados aos projetos hidráulicos, à qualidade da água, ao manejo inadequado da irrigação e à manutenção preventiva inadequada do sistema (COELHO, 2007).

Para atingir alta eficiência, devem ser observados os fatores que afetam a uniformidade de emissão, como a variação de vazão dos emissores ao longo da lateral, decorrente da variação de pressão por perda de carga e por desnível geométrico, a variação de vazão por variabilidade de fabricação dos emissores, a obstrução de emissores e as variações de temperatura da água ao longo da lateral (PROVENZNO e PUMO, 2004).

A perda localizada de carga ocorre quando o fluido sofre alguma perturbação brusca em seu escoamento, por algum elemento inserido no tubo. A perda de carga linear 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. É variável de acordo com o tamanho das rugosidades da parede do tubo e com a velocidade da água. Esses fatores provocam vários graus de perda de carga, distinguindo-se o fluxo em regimes.

No dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento, é imprescindível determinar as perdas totais de cargas que ocorrem ao longo da tubulação (perda de carga linear mais perdas localizadas). As perdas localizadas provocadas pelos emissores dentro da tubulação, muitas vezes, são desprezadas (AL-AMOUD, 1995). Entretanto elas são significativas e de grande importância para dimensionar-se o comprimento máximo das linhas laterais (KELLER E KARMELI, 1974; BAGARELLO et al., 1997), sobretudo quando se deseja otimizar o custo total do projeto.

A perda localizada de carga, causada pelo emissor, depende da área que ele ocupa na tubulação e de sua forma geométrica, existindo, comumente três tipos de conexões: sobre a linha (*on-line*), na linha (*in-line*) e emissores integrados dentro da linha. Bagarello et al. (1997), Alves (2000), Cardoso (2007) e Rettore Neto (2008) propuseram equações, através de modelagem matemática, para calcular a perda localizada de carga provocada por emissores inseridos e integrados no tubo. Os modelos basearam-se no teorema de Bélanger, utilizando relações geométricas do tubo e dos emissores.

Os fabricantes disponibilizam, aos projetistas de sistemas de irrigação por gotejamento, vários modelos de emissores, porém, em geral, não apresentam, nos catálogos de características do produto, informações sobre as relações dimensionais dos emissores e a perda localizada de carga que eles provocam no escoamento através da tubulação. Essas relações dimensionais são importantes para prever-se a perda localizada de carga durante a execução do projeto hidráulico.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de relacionar a perda localizada de carga em gotejadores coaxiais integrados em tubos de polietileno com a geometria da seção de escoamento no ponto de inserção, mediante a utilização de um índice de obstrução calculado pelas relações entre as áreas de escoamento no tubo uniforme e na passagem pelo gotejador.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação localizada

Nos anos 60, o desenvolvimento do método de irrigação por gotejamento constituiu um passo significativo na história da ciência e da tecnologia da irrigação. As primeiras tentativas foram marcadas por muitas dificuldades técnicas e operacionais; no entanto, ao longo dos anos, a maior parte dos problemas foi resolvida e muitos aspectos foram dominados, especialmente nas áreas de filtragem, tratamento de água e tecnologia de emissores (EVANS; WU e SMAJSTRALA, 2007).

A irrigação localizada é o processo de aplicação de água em alta frequência e baixo volume, na superfície do solo ou na subsuperfície, mantendo, com alto grau de umidade, um pequeno volume de solo que contém o sistema radicular das plantas. Mais comumente, a água é aplicada na forma de gotas na superfície ou na subsuperfície do solo (irrigação por gotejamento) e por aspersão de baixo volume (irrigação por microaspersão, difusão), utilizando-se emissores instalados ao longo de uma tubulação paralela à linha de plantas. O termo irrigação localizada é um substituto do termo em inglês *trickle irrigation*, porque este não pode ser traduzido diretamente para outros idiomas, como francês, espanhol e português, e porque enfatiza que somente uma fração do volume de solo é molhada. Em muitos países, existe a preferência pelo uso do termo microirrigação, porém todos os termos alternativos possuem suas próprias limitações (KELLER e BLIESNER, 1990)

Na irrigação por gotejamento, destacam-se as seguintes características (SCHWANKL e HANSON, 2007): (1) a água é aplicada com baixa vazão; (2) a água é aplicada por longos períodos; (3) a água é aplicada em intervalos frequentes; (4) a água é aplicada próxima à zona radicular ou dentro dela; (5) a água é aplicada por sistemas de baixa pressão e (6) a água é rotineiramente usada para transportar fertilizantes e outros produtos químicos.

De acordo com Dasberg e Or (1999), a irrigação localizada é um método de irrigação flexível e oferece potencial para a irrigação de precisão com elevado nível de

manejo. Esse método pode ser adaptado a muitas situações de cultivos e zonas climáticas. Pode ser utilizado em uma ampla gama de condições topográficas e de tipos de solo, e isso tem permitido expandir a produção vegetal em áreas irrigadas, com problemas de solo (solo com alta ou baixa taxa de infiltração e solo salino) e má qualidade da água, nas quais não poderiam ser usados outros métodos de irrigação. Pode ser utilizado na maioria das culturas agrícolas, embora seja mais comum o uso em culturas de alto valor econômico, como legumes e hortaliças, plantas ornamentais, uva, citros, mamão, abacate, pêssigo, café, morango e cultivos em estufas. Em muitos casos, pode ser economicamente utilizada em cultivos de cereais, algodão e cana-de-açúcar. No entanto, Evans; Wu e Smajstrala (2007) salientam que os requisitos para o projeto e o manejo em áreas úmidas podem ser diferentes daqueles para zonas áridas, não sendo as técnicas adequadas a uma área necessariamente apropriada para outra. Como os demais métodos, a irrigação localizada não é o mais adequado para todas as culturas, as situações de terreno, as condições sociais, econômicas e os objetivos do usuário.

Os sistemas de irrigação localizada são geralmente definidos pelo dispositivo de emissão de água (KELLER e BLIESNER, 1990). Esses dispositivos variam desde os simples orifícios em tubos plásticos de paredes finas, os emissores de fluxo laminar de longo percurso, os microtubos e os microaspersores até os mais elaborados e mais eficientes emissores de fluxo turbulento e compensadores de pressão. Alguns dispositivos de emissão são fabricados como parte integrante dos tubos de plástico e fitas, enquanto outros são inseridos durante a instalação (EVANS; WU E SMAJSTRALA, 2007).

O uso da irrigação localizada está aumentando rapidamente em todo o mundo, principalmente pela ocupação de áreas anteriormente irrigadas por sistemas de irrigação por superfície (COELHO, 2007). Com o aumento da demanda pelos recursos hídricos limitados e a necessidade de minimizar as conseqüências ambientais da irrigação, essa tecnologia de irrigação irá desempenhar um papel ainda mais importante no futuro (DASBERG e OR, 1999). A irrigação localizada oferece muitos benefícios agrônômicos quanto à conservação de água e de energia, que podem resolver muitos dos desafios enfrentados pela agricultura irrigada. Agricultores e outros usuários da

irrigação localizada estão continuamente à procura de novas aplicações, tais como a reutilização de águas residuais, que continuará a prover novos desafios para os projetistas e os irrigantes (TROOIJEN e HILLS, 2007).

Qualquer sistema de irrigação deve ser compatível com as operações culturais associadas a uma determinada cultura. A adoção da irrigação localizada pode exigir adaptações inovadoras de várias práticas culturais e até mesmo o desenvolvimento de novos equipamentos de cultivo e de colheita. Por exemplo, as linhas laterais na superfície do solo podem dificultar as operações tradicionais de colheita, exigindo a remoção dos tubos antes da colheita ou o desenvolvimento de uma nova colhedora ou de novas técnicas de colheita. As linhas laterais podem ser enterradas, mas isso geralmente requer um cultivo com o mínimo movimento de solo, como o cultivo mínimo ou o sistema de plantio direto (EVANS; WU e SMAJSTRALA, 2007).

O objetivo final de qualquer atividade agrícola é atingir o máximo retorno econômico líquido. A uniformidade de irrigação, as práticas de programação da irrigação, o custo da água, o preço dos produtos, a redução da produtividade pelo déficit e pelo excesso de água e os danos causados por excesso de irrigação, incluindo possível contaminação das fontes de água, são fatores importantes que afetam o retorno econômico de um sistema de produção irrigado. Esses fatores, na verdade, afetam a seleção de um sistema de irrigação (SCALOPPI, 1986).

Uma limitação significativa ao uso da irrigação localizada, e em especial à irrigação por gotejamento, é a permanente necessidade de manutenção (NAKAYAMA, BOMAN e PITTS, 2007). Devido ao tamanho relativamente pequeno dos orifícios, os emissores de microirrigação podem ser facilmente obstruídos por processos físicos, químicos e biológicos. O entupimento afeta negativamente a uniformidade da distribuição de água e pode anular os benefícios da irrigação localizada, constituindo a grande preocupação no manejo desses sistemas (GILBERT et al., 1981; WU, 1997). A obstrução dos emissores é considerada o mais sério problema em microirrigação, a não ser que sejam tomadas medidas preventivas (KAHLONN e KEMPER, 2007). A obstrução afeta a taxa de aplicação e a uniformidade da distribuição de água, aumentando os custos de manutenção, com a reposição de peças, a recuperação e as inspeções (SOLOMON e KELLER, 1978; WU, 1997). Podem ocorrer a diminuição da

produção e danos às culturas, se a obstrução não for detectada e eliminada em tempo hábil. Duas alternativas têm sido apresentadas para minimizar o problema. A primeira é o desenvolvimento de emissores menos sensíveis à obstrução e a segunda, melhorar a qualidade da água de irrigação (NAKAYAMA, GILBERT e BUCKS, 1978; NAKAYAMA, BOMAN e PITTS, 2007). A manutenção preventiva (incluindo filtragem da água, tratamento químico, lavagem das linhas laterais e inspeções de campo) é provavelmente a solução mais efetiva para evitar os danos da obstrução dos emissores (TEIXEIRA, 2007). Muitas vezes, o tratamento da água para irrigação localizada não é economicamente viável, sendo necessário considerar a utilização de outros métodos de irrigação (EVANS; WU e SMAJSTRALA, 2007).

2.2 Linha lateral

As linhas laterais são tubos que recebem a água de outras linhas de maior diâmetro (linha de derivação) e a distribuem, através de emissores, ao longo de seu comprimento. Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2005), linha lateral é a linha na qual estão inseridos os emissores. São constituídas de material plástico flexível, PVC ou polietileno, com diâmetros inferiores a 25 mm, sendo mais comuns os de 13, 16,18 e 22 mm. Essas linhas são espaçadas, ao longo das linhas de derivação, com distâncias definidas em função do espaçamento entre fileiras de plantas e, portanto, o espaçamento depende do tipo de planta a ser irrigada.

A alteração do diâmetro das linhas laterais é algo comum de ocorrer, já que sua flexibilidade permite essa alteração. Esse tipo de deformação é provocado pela pressão que o fluido exerce na parede interna do tubo. Assim, os projetistas devem estar atentos a esse fenômeno, uma vez que o diâmetro na equação universal de perda de carga, utilizando o fator de atrito de Blasius, é elevado à potência 4,75, o que eleva bastante o erro para um pequeno acréscimo no diâmetro.

O dimensionamento hidráulico do sistema deve ser realizado com cautela, requerendo característica técnica sobre os emissores, as tubulações, o sistema de filtragem e os acessórios diversos a serem utilizados para possibilitar a redução de custos e a maximização do lucro na atividade agrícola. Particularmente, o

dimensionamento de uma linha lateral deve seguir critérios que permitam atingir alta uniformidade de distribuição de água. Para os emissores não-compensados, a uniformidade de emissão de vazão, ao longo da linha lateral, depende da variação de pressão por perda de carga na tubulação, por variação da topografia da área irrigada, pelo coeficiente de variação de fabricação do emissor, do número de emissores por planta, da temperatura da água e do grau de obstrução dos emissores (WU, 1997; PROVENZANO e PUMO, 2004).

2.3 Gotejadores

O gotejador exerce função de grande importância. Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2005), gotejadores são peças que dissipam a pressão e permitem a passagem da água da linha lateral para o meio externo, de uma forma controlada (2 a 20 L h⁻¹ a uma pressão média de operação de 100 kPa).

A ABNT/CE-04:015.08-16 (2006) categoriza os gotejadores e os tubos gotejadores de acordo com os seguintes critérios:

- **Quanto à reutilização:** existem duas categorias de tubos gotejadores:
 - Tubos gotejadores não-reutilizáveis
 - Tubos gotejadores reutilizáveis
- **Quanto ao tipo de regulagem de pressão:** existem duas categorias de operação:
 - Gotejadores ou tubos gotejadores não-regulados
 - Gotejadores ou tubos gotejadores regulados
- **Quanto ao tipo de operação a baixa pressão:** são duas categorias:
 - Gotejador ou tubo gotejador regular
 - Gotejador anti-drenante
- **Quanto ao tipo de conexão do gotejador no tubo:** existem três tipos de conexão:
 - Gotejador *on-line*
 - Gotejador *in-line*
 - Gotejadores formados ou integrados no tubo (tubo gotejador)
- **Quanto ao tipo de gotejador de múltiplas saídas:** existem duas categorias

- Gotejador múltiplo
- Gotejador regular de múltiplas saídas.

As seguintes definições são importantes para distinguir os tipos de gotejadores e os tubos gotejadores (ABNT/CE-04:015.08-16, 2006):

Gotejador *in-line* é o emissor projetado para instalar-se entre dois trechos de tubo em uma linha lateral de irrigação.

Gotejador *on-line* é o emissor projetado para instalar-se na parede de uma lateral de irrigação, quer diretamente, quer indiretamente, por meio de um microtubo.

Gotejador de múltiplas saídas é o emissor no qual a vazão é dividida e direcionada, de forma distinta, a vários pontos de emissão.

Emissor múltiplo é emissor de múltiplas saídas, no qual cada saída é um emissor secundário com sua própria vazão. A relação vazão-pressão e a vazão de cada saída não são dependentes da vazão de outros emissores.

Tubo gotejador é um tubo contínuo ou microtubo, incluindo tubos colapsáveis (fitas) com perfurações ou com outros dispositivos hidráulicos modelados ou integrados no tubo ou no microtubo, durante o processo de fabricação, e projetados para proporcionar a vazão na forma de gotas.

Gotejador e tubo gotejador regulado é um emissor ou tubo emissor compensador de pressão, mantendo a vazão relativamente constante a pressões variadas de água na entrada do emissor ou do tubo emissor, dentro dos limites especificados pelo fabricante.

Gotejador e tubo gotejador não-regulado é um emissor ou tubo emissor não compensado de pressão na entrada do emissor ou do tubo emissor, cuja vazão varia com a pressão da água na entrada.

Gotejador e tubo gotejador anti-drenante é um emissor ou tubo emissor cuja vazão é zero sempre que a pressão de entrada é mais baixa que um certo valor (diferente de zero), declarado pelo fabricante.

Tubo gotejador não-reutilizável é aquele que não foi projetado para a remoção do campo e para a reinstalação.

Tubo gotejador reutilizável é aquele que foi projetado para a remoção do campo e a reinstalação com manuseio adequado.

Os gotejadores são fabricados para operar em uma faixa de pressão adequada, chamada de pressão de serviço, dependendo a quantidade de água aplicada de uma relação numérica, envolvendo a pressão de operação. Existem os que trabalham com vazões constantes em uma faixa ampla de pressão (emissores compensados de pressão), que é uma característica desejável, pois permite uma distribuição uniforme da vazão de água ao longo da linha, e outros com maior variação de vazão para uma mesma faixa de pressão (emissores não-compensados de pressão). A relação matemática entre pressão e vazão, para um gotejador, é denominada equação característica do emissor (KELLER e BLIESNER, 1990), representada pela eq. (1).

$$q = \beta H^x \quad (1)$$

em que: q – vazão do gotejador ($L h^{-1}$); β – coeficiente de ajuste; H – pressão de operação (kPa); x – coeficiente do regime de escoamento do emissor.

Os gotejadores provocam perda localizada de carga na linha lateral. Muitos autores reconhecem que as turbulências são geradas pela contração que os gotejadores e suas conexões provocam no diâmetro interno da linha lateral, reduzindo a seção de passagem da água. A introdução de gotejadores na linha lateral modifica o curso das linhas de fluxo, causando turbulência local que resulta em perdas adicionais de carga às perdas distribuídas no tubo. A turbulência é devida à presença de um elemento na parede interna do tubo, que causa um grau de obstrução na seção de escoamento, diminuindo o diâmetro de escoamento (AL-AMOUD, 1995; BAGARELLO et al., 1997; JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002 a,b; PROVENZANO; PUMO, 2004; PROVEZANO; PUMO; DI DIO, 2005; PALAU-SALVADOR et al., 2006)

2.4 Perdas de carga em linhas laterais de gotejamento

A perda de carga nas tubulações é um fator importante para os projetos de engenharia de irrigação, pois afeta o custo total e o balanço hidráulico do sistema (KAMAND, 1988). O diâmetro dos tubos da rede de distribuição de água depende da perda de carga admitida no sistema pelo projetista. O custo operacional é afetado inversamente pelo diâmetro dos tubos: com o aumento do diâmetro, para uma determinada vazão, a perda de carga por unidade de comprimento diminui, reduzindo a energia de bombeamento requerida, porém proporciona o aumento do capital necessário para a aquisição dos tubos. Nesse caso, o projetista deve determinar o sistema ótimo e econômico.

Por simplicidade matemática, muitos projetistas de sistemas de irrigação preferem utilizar equações empíricas, como de Hazen-Williams, Manning e Scobey, para determinar as perdas de cargas, em vez de utilizar as equações teóricas de Darcy-Weisbach. Entretanto uma importante limitação dessas equações empíricas é que um fator de rugosidade constante é assumido para todos os diâmetros e velocidades de escoamento (KAMAND, 1988). Em decorrência dessa suposição, a perda de carga calculada pelas equações empíricas pode diferir significativamente daquela calculada pela equação de Darcy-Weisbach, na qual o fator de atrito varia com as condições de escoamento (BOMBARDELLI; GARCIA, 2003). Isso pode influenciar na seleção dos diâmetros dos tubos e, conseqüentemente, na estimativa da energia requerida.

Existe um predomínio de material plástico nas tubulações das redes de distribuições de água de sistema de irrigação localizada; isso porque, para tubulações de pequenos diâmetros, que transportam pequenas vazões, os tubos de plásticos fabricados em polietileno de baixa densidade são economicamente mais competitivos que os tubos dos demais materiais disponíveis no mercado. Em razão de esses tubos serem produzidos de material plástico, seus diâmetros podem variar em decorrência das variações na pressão de operação. Isso pode influenciar na perda real de carga, o que resultaria em alterações nas condições hidráulicas dos projetos. 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 de 15% a 60,24%, o que poderia alterar sensivelmente as condições hidráulicas de um projeto de irrigação por gotejamento.

O acréscimo no diâmetro do tubo de polietileno, em função da pressão de operação, também foi observado por Frizzone, Vieira e Paz (1998), ao analisarem um tubo gotejador com paredes de 225 μm de espessura. Vilela et al. (2003), trabalhando com tubos de polietileno, com espessuras de paredes de 1325 μm e 1050 μm , observaram influência significativa da pressão de operação no diâmetro dos tubos e relataram que alterações nos diâmetros internos, em virtude de variações na pressão de operação, podem ocasionar variações nas perdas de cargas superiores a 20%. Para os tubos DN12, houve uma relação linear entre a pressão e o diâmetro. Para o tubo DN20, cuja classe de pressão é superior ao DN12, a relação foi potencial, representando maior variação de diâmetro interno com as pressões.

Os resultados encontrados por Vilela et al. (2003) contrariam a suposição de que tubos com paredes de menor espessura apresentariam maior deformações com a pressão de operação. Para explicar esse efeito, além da espessura da parede e do coeficiente de elasticidade do material, outro componente a considerar é a força de deformação que atua nas paredes internas do tubo e que é diretamente proporcional ao diâmetro; portanto, para um comprimento unitário, pressão constante, e mesmo material, no tubo de maior diâmetro atuará maior força na parede interna o que resultará em maior deformação.

O escoamento em tubos está sempre sujeito à resistência hidráulica e à dissipação de energia. A dissipação de energia, representada pela perda de carga, em escoamento permanente e turbulento de fluidos reais, através de tubos de seção cilíndrica, pode ser calculada por diferentes equações, apresentadas na literatura básica de hidráulica (PORTO, 1998). A contribuição mais importante é expressa pela equação

de Darcy-Weisbach (KAMAND, 1988; VON BERNUTH, 1990; BAGARELLO et al., 1995; ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; SONNAD; GOUDAR, 2006), cuja forma é a eq. (2):

$$H_f = f \frac{L_t}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

em que: H_f – perda de carga (L); L_t comprimento do tubo (L); D – diâmetro do tubo (L); V – velocidade média de escoamento (L T⁻¹); g – aceleração da gravidade (L T⁻²); f – fator de atrito, dependente do número de Reynolds (R) e do tamanho das asperezas da parede do tubo (ϵ). Outra forma comum de expressar a perda de carga é a unidade de comprimento de tubo, conforme a eq. (3):

$$J = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

Sendo: J a perda de carga unitária (L L⁻¹).

A resistência hidráulica, expressa como fator de atrito f , constitui a informação básica necessária ao projeto hidráulico. Desde as contribuições pioneiras de Weisbach, em 1845, de Darcy, em 1857, de Boussinesq, em 1877, e de Reynolds, em 1895, citados no trabalho de Yoo e Singh (2005), a resistência ao escoamento hidráulico tem sido objeto de muito interesse e estudo. Na equação de Darcy-Weisbach, a estimativa do fator de atrito f é essencial para o cálculo da perda de carga em redes de tubulações. Para o escoamento laminar ($R < 2000$), o cálculo do fator de atrito é feito pela equação de Hagen-Poiseuille ($f = 64/R$), sendo apenas uma função do número de Reynolds (R), o qual depende exclusivamente das propriedades do fluido, do diâmetro do tubo e da velocidade do escoamento. Porém, para o escoamento permanente turbulento, a estimativa do fator de atrito é mais complexa, pois f é uma função da rugosidade relativa das paredes do tubo (ϵ/D) e do número de Reynolds (ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; SONNAD; GOUDAR, 2006).

Para o escoamento turbulento uniforme em tubos comerciais rugosos, a equação de Colebrook-White é mais utilizada para calcular f (PORTO, 1998; ROMEO; ROYO;

MONZÓN, 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006), sendo válida para $2000 < R < 10^8$ e $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$. Essa equação relaciona o fator de atrito com a rugosidade relativa e com o número de Reynolds conforme a eq. (4):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,52}{R\sqrt{f}}\right) \quad (4)$$

em que: ε é a altura das rugosidades do tubo (L). Essa equação é válida também para o caso limite de tubos lisos ($\varepsilon = 0$) e o escoamento completamente turbulento.

Para o escoamento turbulento uniforme em tubos lisos, o tamanho das asperezas não influi sobre a turbulência do escoamento, e o coeficiente f independe da rugosidade do conduto. Assim, a eq. (4) pode ser reescrita como uma relação funcional entre f e R , denominada equação de Von Karman, da seguinte forma eq. (5), (PORTO, 1998):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log(R\sqrt{f}) - 0,8 \quad (5)$$

válida para R entre 4000 e $3,4 \times 10^6$

As eqs. (4) e (5) são implícitas em f e requerem soluções por métodos numéricos iterativos como o de Newton-Raphson. Embora o trabalho computacional seja trivial no contexto da capacidade dos atuais computadores, as estimativas de f por métodos iterativos podem aumentar significativamente o trabalho computacional para redes de tubulações complexas, para as quais é necessário o cálculo de múltiplos fatores de atrito. Além disso, o valor inicial atribuído a f e o critério de convergência para as iterações deverão ser selecionados cuidadosamente, para se obter exatidão na estimativa. Reconhecendo essas dificuldades, vários autores propuseram aproximações explícitas para as eqs. (4) e (5), tornando-as convenientes para implementações computacionais (SWAMEE; JAIN, 1976; ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006).

Para tubos lisos e $4000 \leq R \leq 10^5$ o fator de atrito pode ser estimado por uma equação simples, proposta por Blasius (VON BERNUTH, 1990). A equação de Blasius é uma função somente do número de Reynolds, sendo representada pela eq. (6):

$$f = \frac{c}{R^m} \quad (6)$$

Blasius, ao propor essa equação para estimar f , determinou m como uma constante de valor igual a 0,25, enquanto o coeficiente c seria outra constante de valor igual a 0,316. Para Von Bernuth (1990), a inserção do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach resulta em uma equação combinada com as seguintes vantagens: (a) é teoricamente perfeita e dimensionalmente homogênea. Tanto a equação de Darcy-Weisbach quanto a de Blasius têm bases teóricas; (b) tem bom grau de exatidão para tubos plásticos quando $4000 \leq R \leq 10^5$. O número limite de Reynolds não é restritivo para sistemas de irrigação que usam tubos com diâmetros inferiores a 80 mm; (c) pode ser facilmente corrigida para variações na viscosidade da água. Von Bernuth (1990) salienta que, para R menor que 4000, a equação de Blasius superestima os valores de f .

Considerando-se os coeficientes da equação de Blasius, a eq. (3) pode ser reescrita na forma da eq. (7):

$$J = K\eta^{0,25}Q^{1,75}D^{-4,75} \quad (7)$$

em que: η – viscosidade cinemática da água ($1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$); $K = 2,458 \times 10^{-2}$ para o sistema internacional de unidades; Q – vazão ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$); D – diâmetro interno do tubo (m).

A determinação dos coeficientes da equação de Blasius também foi alvo de estudo de Bagarello et al. (1995). Esses autores, trabalhando com tubos de diâmetros nominais de 16, 20 e 25 mm, variaram o número de Reynolds pela mudança da viscosidade do fluido (R entre 3.037 e 31.373), ao se alterar a temperatura, obtendo $c = 0,302$ para $m = 0,25$. O valor do coeficiente c foi dado por uma constante que

representou a média dos valores para os diâmetros experimentados. Por outro lado, ao fazerem uma análise semi-teórica do fator de atrito, estudando o perfil de distribuição da velocidade em uma seção da tubulação, concluíram que o coeficiente c pode variar bastante, sendo possível correlacioná-lo com R , propondo-se uma equação da seguinte forma:

$$c = \frac{6,152}{R^{0,183}} \quad (8)$$

enquanto o valor do expoente m pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$m = \frac{2}{8 - \frac{12,4}{R^{0,157}}} \quad (9)$$

Alternativas empíricas para determinar f , por ensaios de laboratórios, satisfazem a expectativa de se obterem resultados satisfatórios, já que alguns autores (VON BERNUTH, 1990; BAGARELLO et al., 1995; HATHOOT; AL-AMOUD; MOHAMMAD, 1993) obtiveram bons resultados usando equações do tipo potência, semelhantes à de Blasius. Alves (2000) mostrou que, no regime de escoamento turbulento em tubos lisos, com R entre 7.000 e 40.000, a equação de Blasius é uma forma cuidadosa para determinar o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach.

2.5 Perda de carga nos emissores

As instalações dos emissores têm bastante influência na perda de energia em linhas laterais de gotejadores, sendo os valores desta perda função da área de protrusão e do diâmetro da linha. Al-Amoud (1995) obteve aumento de perda de carga maior que 32%, quando comparada à das tubulações sem emissores em tubos com diâmetro de 13 mm.

Para avaliar, com exatidão, as perdas de carga ao longo das linhas laterais de irrigação por gotejamento, devem ser consideradas as perdas contínuas de cargas nos segmentos uniformes da tubulação e as perdas localizadas, devidas à presença dos emissores (BAGARELLO et al., 1997; AL-AMOUD 1995; PROVENZANO; PUMO; DI DIO, 2005).

Várias pesquisas têm sido publicadas para analisar o escoamento permanente e turbulento, em linhas laterais de irrigação localizada (WU; GITLIN, 1975; VON BERNUTH, 1990; KANG; NISHIYAMA; CHEN, 1996; WU, 1997; ZAYANI et al., 2001). Alguns trabalhos, entretanto, não consideram as perdas localizadas de carga, por julgá-las de menor significância. Recentemente, tem-se reconhecido a importância dessas perdas de carga, o que tem estimulado o desenvolvimento de modelos matemáticos para estimá-las (BAGARELLO et al., 1997; JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002 a, b; PROVENZANO; PUMO, 2004; PROVENZANO; PUMO; DI DIO, 2005; PALAU-SALVADOR et al., 2006, CARDOSO, 2007).

A perda localizada de carga, H_{f_L} , nos emissores ou em suas conexões com a lateral, deve-se à resistência à movimentação da corrente fluída, oferecida pelo elemento obstrutor no interior do tubo, sendo expressa na forma clássica como uma fração da carga cinética (K), obtida pelo princípio da similaridade de Reynolds, eq. (10):

$$H_{f_L} = K \frac{V_0^2}{2g} \quad (10)$$

em que: H_{f_L} – perda localizada de carga (L); V_0 – velocidade média de aproximação da corrente fluída (L T); K – coeficiente de carga cinética ou de resistência de perfil, g – aceleração da gravidade (L T⁻²). Aumentando-se a velocidade de escoamento, maiores serão as perdas localizadas, uma vez que a turbulência do fluido na passagem entre o emissor e a parede do tubo tende a aumentar.

O coeficiente K depende das características geométricas da inserção do emissor e do número de Reynolds, R . Para uma dada seção do tubo (A), uma vazão transportada (Q) e uma conexão com dimensões definidas, o valor de K reduz-se com

o aumento de R até certo limite, a partir do qual se mantém aproximadamente constante (BAGARELLO et al., 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004). Na prática, o efeito das forças viscosas é negligenciado a partir de um valor limite de R (superior a 10 000 segundo BAGARELLO et al., 1997). Nesse caso, o fator K pode ser expresso apenas por relações geométricas entre a seção de escoamento nos tubos e a do elemento obstrutor.

A perda localizada de carga na inserção do emissor, ao longo da linha lateral, foi derivada com base no teorema de Bélanger e avaliada pela equação que tem o coeficiente de carga cinética multiplicado pela carga cinética, sendo comprovada experimentalmente para determinar a perda localizada em laboratório (JUANA et al, 2002),

Para emissores “on-line”, a relação entre K e a geometria da seção de escoamento pode ser obtida, utilizando-se o teorema de Bélanger, aplicado a uma contração brusca da seção e a subsequente ampliação, cujo esquema é apresentado na Figura 1, em que $A_c = r A$, sendo r a razão de obstrução. A_c representa a área de passagem do fluido pela tubulação com emissor inserido e A representa a área de passagem do fluido pelo tubo sem emissor. Da mesma forma, V_c e V representam as velocidades em cada seção.

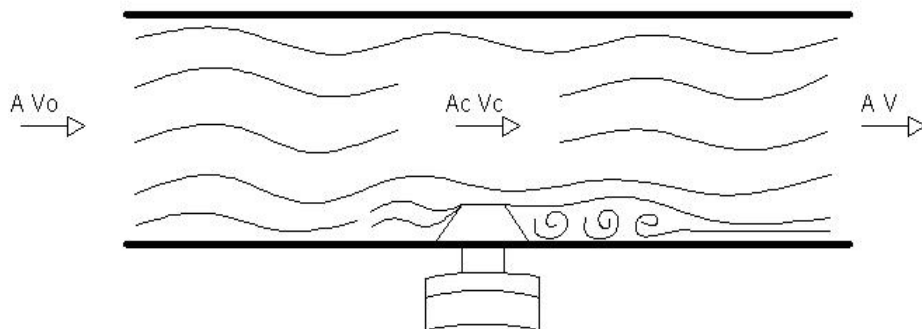


Figura 1 – Esquema do escoamento de água através de conexões de emissores on-line

Aplicando-se os teoremas da conservação da energia e da massa entre as seções A_c e A , chega-se à equação de Bélanger, eq. (11):

$$Hf_L = \frac{(V_c - V)^2}{2g} = \left(\frac{A}{A_c} - 1 \right)^2 \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

Comparando-se as eqs. (10) e (11), verifica-se que são equivalentes, pois as velocidades V_o e V são iguais. Na eq. (11), o fator geométrico é denominado índice de obstrução (IO) eq. (12):

$$IO = \left(\frac{A}{A_c} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1-r}{r} \right)^2 \quad (12)$$

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

O coeficiente de carga cinética K depende do tamanho e da forma da protrusão do conector e, devido à variabilidade morfológica (forma e tamanho) de fabricação, os conectores de emissores comerciais requerem investigação experimental particular. Pela dificuldade de sintetizar a complexidade do escoamento por meio de um elemento obstrutor na tubulação, tem-se proposto o desenvolvimento de relações empíricas para expressar K , em função do grau de obstrução causado por protrusões na seção de escoamento. Para conexões “on-line”, Bagarello et al. (1997) propuseram a seguinte relação empírica, eq. (13):

$$K = 1,68 \left(\frac{1}{r} - 1 \right)^{1,29} \quad (13)$$

Al-Amoud (1995) apresentou um trabalho em que, utilizando oito tipos de conectores “on-line”, constatou acréscimo de perda de carga nas conexões dos emissores em relação ao tubo sem emissor, tendendo a crescer com o aumento das saliências dos conectores, podendo chegar a 32%, num espaçamento de 1 m entre os emissores. O autor propõe que os valores de Hf_L possam ser encontrados experimentalmente da seguinte forma: mede-se a perda de carga unitária em uma linha

lateral sem emissor (J) e, em seguida, faz-se a mesma medida de perda de carga na linha com emissores vedados (J^*). As diferenças entre os valores de perdas de carga devem ser multiplicadas pelo comprimento da linha (L) e divididas pelo número de emissores (N) conectados a ela. O resultado é a perda de carga provocada por um emissor. Esse processo é representado pela eq. (14):

$$H_{f_L} = \frac{J^* - J}{N} L \quad (14)$$

As linhas laterais de irrigação localizada são de polietileno flexível de baixa densidade. Conseqüentemente, devem-se esperar variações na geometria ao longo do tubo. Isso pode dificultar a obtenção de medidas precisas, especialmente aquelas relativas ao índice de obstrução decorrente da protrusão dos conectores. Portanto, a estimativa de r deve ser feita com base estatística, utilizando-se valores médios de A_c e A (JUANA; RODRIGUEZ-SINOBAS; LOSADA, 2002a), pois esses valores podem ser modificados pelo efeito da pressão de operação sobre o diâmetro interno do tubo, dependendo da elasticidade do polietileno (VILELA et al., 2003).

Demir; Yurdem e Degirmencioglu (2007) desenvolveram um modelo matemático que é possível utilizar na determinação da perda de carga em gotejamento lateral, na linha de emissores, em diferentes espaços distantes de 0,2 a 1m.

Em pesquisas realizadas por RETTORE NETO (2008), determinou-se a perda localizada de carga em tubulações com emissores não coaxiais, comumente denominados gotejadores do tipo pastilha, desenvolvendo-se equações gerais de perda de carga, através de um modelo matemático, a partir de um índice de obstrução.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Montagem do experimento e modelos de tubos gotejadores estudados

O trabalho foi realizado no laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba – SP. Os tubos utilizados no experimento foram de polietileno, de pequenos diâmetros, com emissores coaxiais, do tipo bóbi, fabricados pela Amanco e pela Naandan. As suas características operacionais são apresentadas na Tabela 1 e suas formas, na Figura 2.

Tabela 1 – Características principais dos tubos e emissores utilizados nos ensaios

Diâmetro Nominal (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Fabricante	Modelo	Pressão de operação (kPa)	Vazão (L/h)	Espaçamento entre emissores (m)
16	13,70	Amanco	Drip AC	100 - 450	2,3 - 4,0	0,90
16	13,60	Amanco	Drip	100 - 750	1,4 - 4,5	0,95
16	13,00	Naandan	PC	100 - 350	1,3 - 3,8	1,00
16	13,30	Naandan	TIF	100 - 350	1,0 - 4,0	1,00

PC e AC – auto-compensante

(a) Amanco Drip AC



(b) Amanco Drip



(c) Naan PC



(d) Naan Tif



Figura 2 – Modelos de gotejadores utilizados no experimento. Fonte: Catálogos de produtos da Amanco e da Naandan

Para os ensaios, utilizou-se uma bancada composta por um reservatório de 1000 litros (caixa d'água), uma motobomba modelo C3000-KSB, ligada a um inversor de frequência Siemens, modelo Micromaster 420, com a finalidade de manter a rotação do motor constante; três registros de gaveta, com o propósito de regular a pressão no início do tubo gotejador e um medidor de vazão magnético indutivo. Para o monitoramento da pressão de operação do sistema, utilizou-se um manômetro digital na faixa de trabalho de 0 a 1500 kPa, com precisão de 1 kPa. Na determinação da perda localizada de carga, utilizou-se um manômetro diferencial, com escala de leitura em mm, de mercúrio. O esquema de montagem do experimento é mostrado nas Figuras 3 e 4.

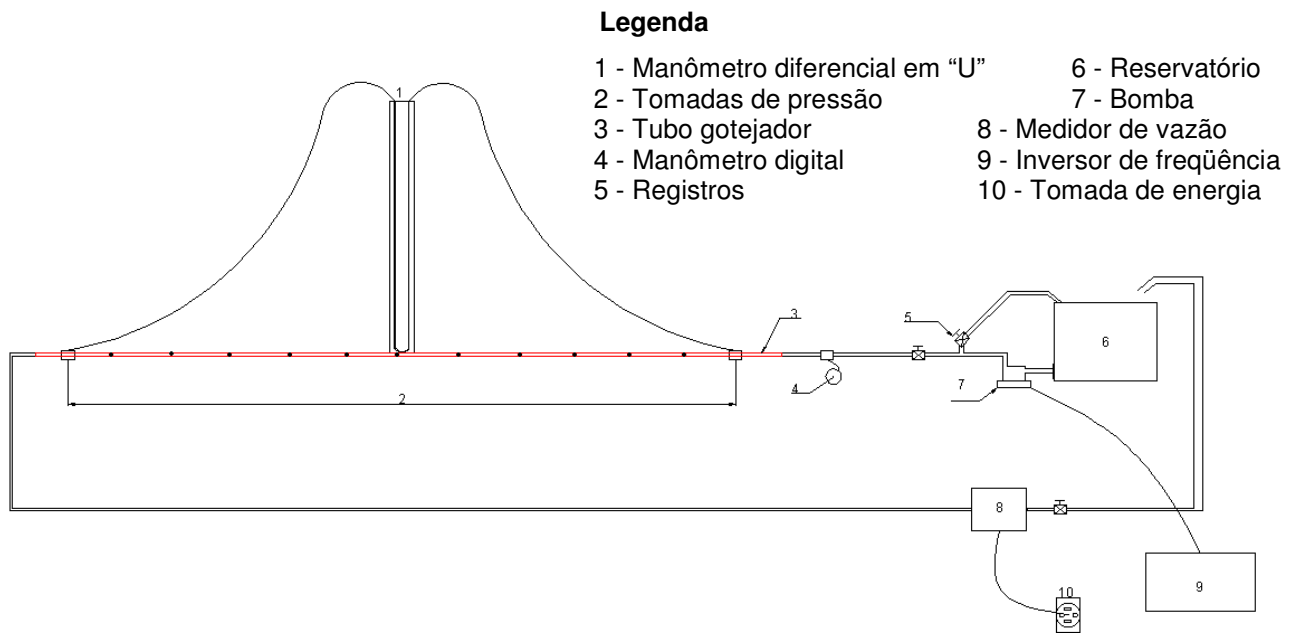


Figura 3 - Croqui da bancada de ensaio de perda localizada de carga

Previamente aos ensaios para determinar as perdas de carga nos tubos gotejadores, foram realizados cálculos para se obterem as vazões que proporcionariam o número de Reynolds mínimo de 4000, para cada tubo gotejador. Uma vez determinada a velocidade média da água no tubo, pela definição de número de Reynolds, com viscosidade cinemática da água igual a $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, determinou-se a vazão pela equação da continuidade [eq. (15)]. No experimento, utilizaram-se 20

valores de vazões no intervalo de 80 a 1600 m³ h⁻¹, com a pressão de operação mantida em 200 kPa.

$$Q = A \cdot V \quad (15)$$

sendo: Q – vazão (m³ s⁻¹), A – área do tubo (m²) e V – velocidade (m s⁻¹).

(a) Reservatório de água



(b) Motobomba



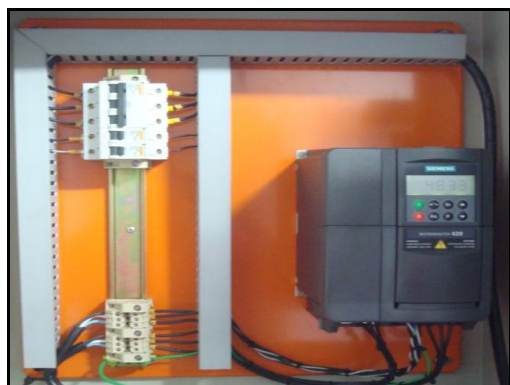
(c) Manômetro digital



(d) Medidor magnético de vazão



(e) Inversor de freqüência



(f) Termômetro



Figura 4 – Equipamentos utilizados no experimento

O diâmetro interno do tubo gotejador foi determinado em 30 anéis de 1 cm de comprimento, utilizando-se um projetor ótico de perfil, acoplado a um computador (Figura 5). Na Tabela 2, são apresentados os diâmetros e as espessuras das paredes dos tubos utilizados nos ensaios.

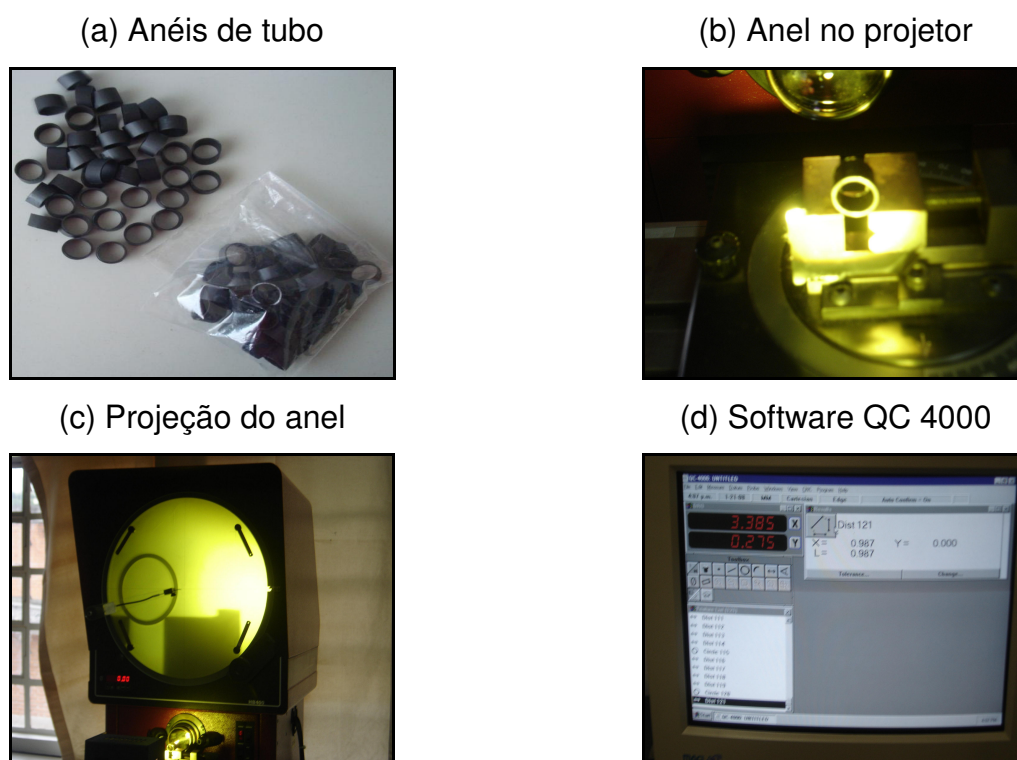


Figura 5 – Vistas parciais do projetor de perfil

Tabela 2 – Características das tubulações ensaiadas

Modelos	Diâmetro interno (mm)		Espessura da parede (mm)	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão
Amanco Drip AC	13,70	0,18	1,04	0,052
Amanco Drip	13,60	0,13	1,07	0,072
Naan PC	13,00	0,18	0,98	0,043
Naan TIF	13,30	0,13	0,99	0,040

3.2 Preparação dos tubos gotejadores

Para bloquear a passagem da água na saída do orifício dos gotejadores, fez-se vedação dos emissores com massa “epox”, envolvendo-os, posteriormente, com uma fita adesiva e borracha flexível, para garantir a vedação (Figura 6).

(a) Emissor com massa “epox”



(b) Emissor com fita adesiva



(c) Envolvimento com borracha



Figura 6 – Processo de vedação dos gotejadores

3.3 Procedimento de perfuração dos tubos (tomada de pressão)

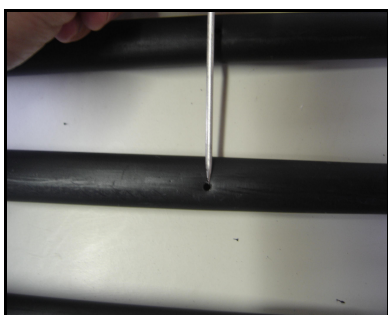
Durante a perfuração dos tubos de polietileno, as rebarbas de material plástico são projetadas para o interior do tubo, constituindo-se um elemento potencial de obstrução parcial do orifício, quando a tubulação é pressurizada, perturbando as medidas de pressão. Para minimizar esse efeito e padronizar o tamanho dos orifícios de tomada de pressão, confeccionou-se um gabarito de aço inox, pontiagudo, com diâmetro de 2,4 mm e comprimento de 20 cm (Figura 7).



Figura 7 – Gabarito de perfuração em aço inox (furador)

Os orifícios para a tomada de pressão foram confeccionados a uma distância dos emissores igual à metade do espaçamento entre eles. Inicialmente, foram feitos furos primários para demarcar o local e, em seguida, o furador foi aquecido para fazer a perfuração definitiva. Para minimizar a ocorrência de rebarbas e retirar os resíduos de polietileno, girava-se o furador suavemente para os lados, movimentando-o verticalmente. A limpeza do gabarito era feito com lixa (nº 120), para deixá-lo áspero, permitindo melhor aderência do polietileno (Figura 8).

(a) Perfuração primária



(b) Perfuração definitiva



(c) Materiais utilizados



Figura 8 – Processo de perfuração dos tubos para a tomada de pressão

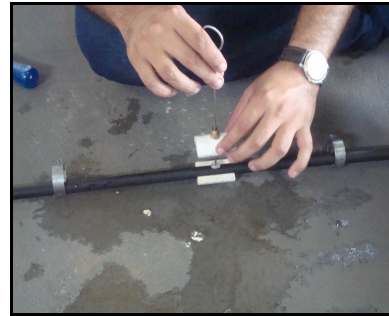
3.4 Instalações das tomadas de pressão

Para preparar as tomadas de pressão, foram utilizadas luvas de PVC, anéis de silicone e presilhas parafusadas lentamente (Figura 9), tendo-se o cuidado de não ocasionar deformação do tubo e causar distúrbios no escoamento da água e perdas adicionais de carga.

(a) Luva de PVC e anel de silicone



(b) Colocação das luvas



(c) Luvas montadas



(d) Acoplamento luva-tomada de pressão



Figura 9 – Processo de colocação das tomadas de pressão para o manômetro

3.5 Determinação da perda localizada de carga

Na determinação da perda localizada de carga nos gotejadores ao longo do tubo, utilizou-se manômetro diferencial (Figura 10), com coluna de mercúrio e escala graduada em milímetros. Utilizaram-se segmentos de tubos contendo 11 gotejadores, com comprimento de 9,90 m e 10,45 m, para os tubos da Amanco, e 11 m de comprimento, com emissores espaçados um metro, para os tubos da NaanDan. Os segmentos de tubo foram furados, em média a 0,45 m do emissor, nos tubos Amanco, e 0,50 m, nos tubos NaanDan, para instalar a tomada de pressão. Para cada tubo gotejador estudado, foram utilizadas sete repetições.

(a) Manômetro diferencial



(b) Escala do manômetro

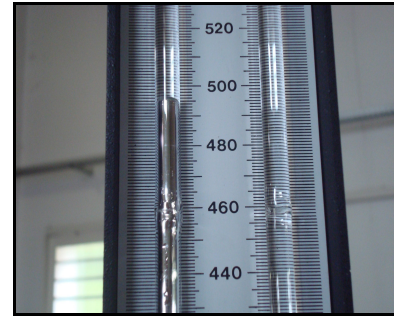


Figura 10 – Manômetro diferencial utilizado no experimento

A conexão dos microtubos no manômetro de coluna foi feita por meio dos conectores observados na Figura 9 d. O ensaio consistia em determinar a vazão que passava no tubo analisado e em avaliar a diferença de pressão ocorrida nos dois pontos, observada no manômetro instalado no circuito. A vazão iniciou com $80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ continuando com intervalos de valores crescentes, de $80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, até chegar a $1600 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, obtendo-se um número de 20 distintas vazões para cada tubo avaliado. No decorrer dos ensaios, foram monitoradas as temperaturas, por meio de um termômetro de mercúrio, com a finalidade de se fazer a correção da viscosidade cinemática da água no cálculo da perda localizada de carga.

Para a tubulação em nível, contendo 11 emissores vedados, considerou-se a perda de carga, no segmento de tubo, como a diferença na leitura da pressão entre os dois pontos avaliados. A perda de carga, observada no tubo com emissor, foi quantificada em função da vazão; para tanto, fez-se uso de um modelo tipo potência, na forma da eq. (16):

$$H_{fte} = aQ^b \quad (16)$$

em que: H_{fte} é a perda de carga no tubo com emissor (mca); Q , a vazão em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$; a e b , constantes.

A perda de carga provocada pelo emissor foi determinada em função da diferença entre a perda de carga do tubo com o emissor e a perda de carga do tubo, calculada pela equação de Darcy-Weisbach, com f determinado para tubo sem emissor, no

comprimento do segmento de tubo e do número de emissores no segmento de comprimento, eq. (17):

$$H_{fe} = \frac{H_{fte} - H_{ft}}{N} \quad (17)$$

em que: H_{fe} é a perda de carga no emissor (mca); H_{ft} , a perda de carga no tubo (mca); N , o número de emissores.

A perda de carga no emissor foi ajustada em função da vazão, utilizando-se um modelo potencial, eq. (18):

$$H_{fe} = \alpha Q^k \quad (18)$$

em que, α é uma constante; Q , a vazão em ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e k , constante.

Para determinar a perda localizada de carga no emissor, em termos de comprimento equivalente de tubulação (L_e), utilizaram-se as equações de Darcy-Weisbach [eq. (2)] e, para a perda localizada de carga, a eq. (10), conforme Reddy (2003). Rearranjando os termos dessas equações, L_e (m) pode ser expresso pela eq. (19):

$$L_e = \frac{KD}{f} \quad (19)$$

sendo: L_e - comprimento equivalente (m); K - coeficiente de carga cinética; D - diâmetro do tubo (m); f - fator de atrito; V - velocidade média da água no tubo (m s^{-1}).

Provenzano e Pumo (2004) e Provenzano et al (2005) desenvolveram uma relação potencial, do tipo da eq. (13), que permite prever o valor de K , em função da razão entre o diâmetro da seção transversal do tubo (D_t) e o diâmetro interno equivalente da seção de escoamento dentro do emissor (D_g), para o domínio $1,04 < D_t/D_g < 1,16$ ($1,08 < A_t/A_g < 1,35$). Para ampliar o domínio dessa função para $1,08 < A_t/A_g < 1,89$, agruparam-se os resultados do experimento com os resultados de Provenzano

et al. (2005) e ajustou-se uma nova função potência aos pares de pontos (K, IO), sendo IO um índice de obstrução definido por $IO = (1-r)^2/r^2$ e r, a razão de obstrução definida por $r = A_g/A_t$.

3.6 Características geométricas dos tubos gotejadores

As principais características geométricas dos emissores e dos tubos emissores estão apresentadas nas Tabelas 3, 4 e 5; para determiná-las, utilizou-se o projetor ótico Starrett, modelo HB 400.

Tabela 3 – Desenho da geometria dos emissores

Emissor	Vista de perfil	Vista frontal
Amanco Drip AC		
Amanco Drip		
Naan PC		
Naan Tif		

Tabela 4 – Característica geométrica e de escoamento dos emissores e tubos emissores

Características geométricas	Emissores			
	Amanco drip	Amanco drip AC	Naandan TIF	Naandan PC
Área do tubo (mm²) - A_t				
Média	144,75	147,74	139,64	133,26
Desvio padrão	2,78	3,86	2,72	3,62
Área do emissor (mm²) - A_g				
Média	106,50	77,90	112,66	76,97
Desvio padrão	0,94	1,07	0,63	2,43
Perímetro molhado (mm) - P_m				
Média	334,42	33,03	353,75	34,19
Desvio padrão	2,96	0,19	1,99	0,49
Diâmetro equivalente do emissor (mm) - D_g				
Média	11,64	9,43	11,98	9,01
Desvio padrão	0,05	0,06	0,03	0,06
Comprimento do emissor (mm) - L				
Média	34,95	34,71	42,33	50,22
Desvio padrão	0,46	0,45	0,35	0,37
Espessura da parede (mm) - e				
Média	3,14	3,17	2,64	2,85
Desvio padrão	0,16	0,09	0,10	0,08

Tabela 5 – Outras características geométricas dos emissores

Emissor	Amanco Drip	Amanco Drip AC	Naan Tif	Naan PC
B (mm)	----	17,03	----	22,35
b (mm)	----	8,20	----	15,40
D (mm)	11,64	11,41	11,98	11,67
De (mm)	17,91	17,75	17,26	17,36
h (mm)	----	4,99	----	5,51

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perda de carga nos tubos gotejadores

Na figura 11, apresenta-se a perda de carga nos tubos gotejadores (H_{fte} , mca), contendo 11 emissores, vedados, em função da vazão. Observa-se que há relação potencial entre a vazão e a perda de carga, com R^2 acima de 0,9996, significando que 99,96% das variações da perda de carga são explicadas pela variação de vazão. Os expoentes da vazão variaram entre 1,7657 e 1,8484, indicando o escoamento turbulento em tubos lisos.

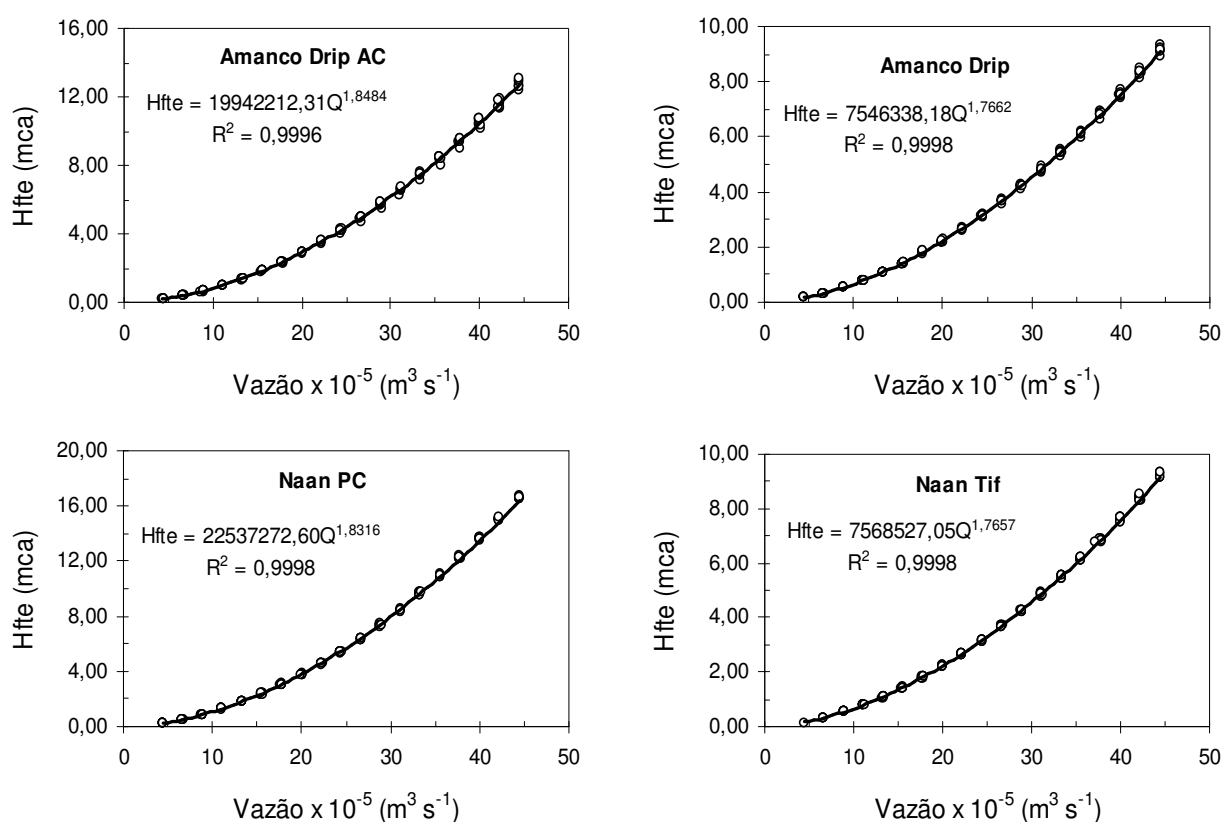


Figura 11 – Perda de carga nos tubos gotejadores contendo 11 emissores, vedados, em função da vazão, para os seguintes comprimentos de tubo: Amanco Drip AC = 9,9 m; Amanco Drip = 10,4 m; Naan PC = 11 m; Naan Tif = 11 m

Utilizando as equações obtidas pelas linhas de tendência e fixando uma vazão de $20 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, obtêm-se as seguintes perdas de carga unitárias no tubo gotejador: Amanco Drip AC = $0,293 \text{ m m}^{-1}$; Amanco Drip = $0,213 \text{ m m}^{-1}$, Naan PC = $0,344 \text{ m m}^{-1}$ e Naan Tif, $0,202 \text{ m m}^{-1}$. Observa-se que os tubos gotejadores autocompensados (Amanco Drip AC e Naan PC) proporcionam maiores perdas unitárias de carga que os tubos gotejadores Amanco Drip e Naan Tif. Considerando-se que os diâmetros dos tubos e o espaçamento entre os emissores não apresentam diferenças apreciáveis, o tubo gotejador Amanco Drip AC (autocompensado) produz uma perda de carga 37,6% maior que o Amanco Drip (não-autocompensado) e o Naan PC (autocompensado) produz uma perda de carga 70,3% maior que o Naan Tif (não-autocompensado). Esses acréscimos na perda de carga estão relacionados à geometria interna do gotejador, uma vez que o dispositivo de regulação de pressão ocupa uma certa fração da área de escoamento.

4.2 Perda localizada de carga nos emissores, em função da vazão

Na figura 12, estão apresentadas as linhas de tendência da perda localizada de carga nos emissores (H_{fe} , mca), em função da vazão (Q , $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), para os dados experimentais, utilizando os emissores Amanco Drip AC, Amanco Drip, Naan PC e Naan TIF, com as respectivas equações e os coeficientes de determinação (R^2). Para todas as curvas, os valores de R^2 foram superiores a 96%, mostrando que, no mínimo, 96% das variações da perda de carga observada podem ser explicadas pelas variações da vazão. A maior dispersão dos valores de perda de carga ocorreu nos ensaios com o gotejador Naan Tif, principalmente para vazões superiores a $20 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

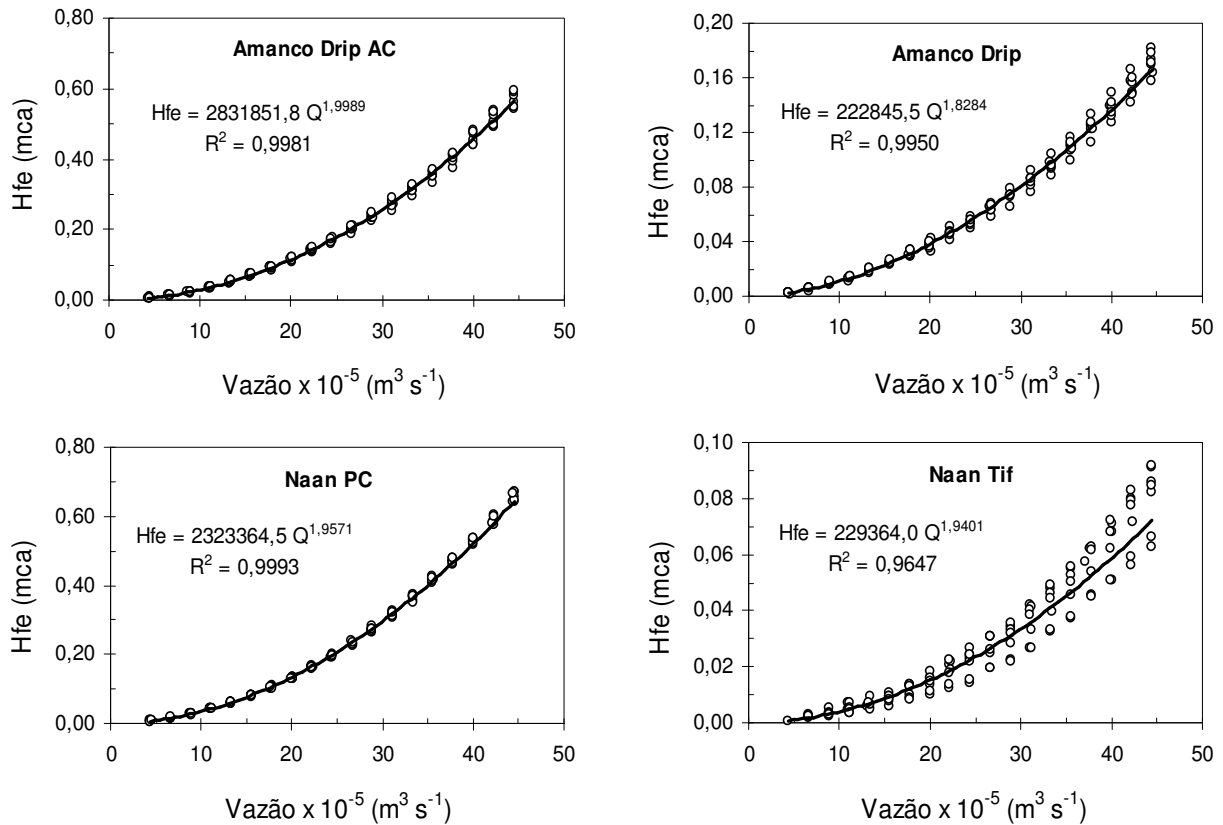


Figura 12 - Perda localizada de carga no emissor, em função da vazão [eq. (18)]

Observa-se que ocorreu maior perda de carga nos modelos de emissores autocompensantes (Amanco Drip AC e Naan PC). Tomando-se, como referência, a vazão de $20 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ as perdas de cargas estimadas nos emissores foram: Amanco Drip AC: 0,114 mca; Naan PC: 0,134 mca; Naan Tif: 0,015 mca; Amanco Drip: 0,038 mca. Entre os gotejadores autocompensantes, o modelo Naan PC apresentou maior perda localizada de carga (uma diferença de 14,9% em relação ao Amanco Drip PC), por apresentar menor diâmetro equivalente na seção de escoamento através do emissor (Tabela 6). Entre os gotejadores não-autocompensantes, o modelo Amanco Drip apresentou maior perda localizada de carga (uma diferença de 60,5% em relação ao Naan Tif), decorrente do menor diâmetro da seção de escoamento através do gotejador. A perda localizada de carga aumentou com a redução da área de escoamento no local de inserção do gotejador, conforme também foi observado nos trabalhos experimentais realizados por Al-Amoud (1995), Bagarello et al. (1997), Provenzano e Pumo (2004),

Provenzano et al. (2005) e Cardoso et al (2007). Esse fato sugere que a perda de carga localizada nos gotejadores pode ser analisada em função da morfologia (forma e tamanho) do emissor.

Para a vazão de $20 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, analisando-se os gotejadores Amanco, observou-se que um aumento de 1,79 vez no grau de obstrução resultou no aumento de 3 vezes na perda localizada de carga (Tabela 6). Já nos gotejadores Naan, um aumento de 2,2 vezes no grau de obstrução proporcionou um aumento de 8,9 vezes na perda localizada de carga.

Tabela 6 - Característica dos emissores e (Hfe mca) para $Q = 20 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Emissores	Vt (m/s)	At (mm ²)	Dg (mm)	Ag (mm ²)	Dg/Dt	Ag/At	GO	Hfe (mca)
Amanco Drip AC	1,36	147,63	9,43*	77,90	0,688	0,528	0,472	0,114*
Amanco Drip	1,38	144,84	11,65	106,60	0,858	0,736	0,264	0,038
Naan PC	1,47	136,35	9,01*	76,97	0,692	0,577	0,423	0,134*
Naan Tif	1,43	139,56	11,98	112,72	0,899	0,808	0,192	0,015

* Dg – diâmetro interno equivalente da seção de escoamento através do gotejador, calculado a partir do raio hidráulico ($Dg = 4 Rh$)

* GO: grau de obstrução ($= 1 - Ag/At$).

Os gotejadores autocompensantes produzem maior perda de carga do que os gotejadores convencionais; entretanto são preferidos pelos projetistas de irrigação localizada, especialmente em terrenos com topografia acidentada, por facilitarem os cálculos hidráulicos e garantir melhor uniformidade na distribuição de água, embora se possam aumentar a perda de carga nas linhas laterais e o custo de aquisição dos emissores.

4.3 Perda localizada de carga nos emissores, em função da carga cinética

Na Figura 13, mostra-se a perda de carga nos emissores causada pela carga cinética ($V^2/2g$, m); verifica-se que, nos modelos não-autocompensantes, ocorreram maiores dispersões nas perdas de carga observadas, aumentando com o aumento da velocidade. Observa-se, também, que a tendência das curvas é semelhante para os quatros emissores estudados.

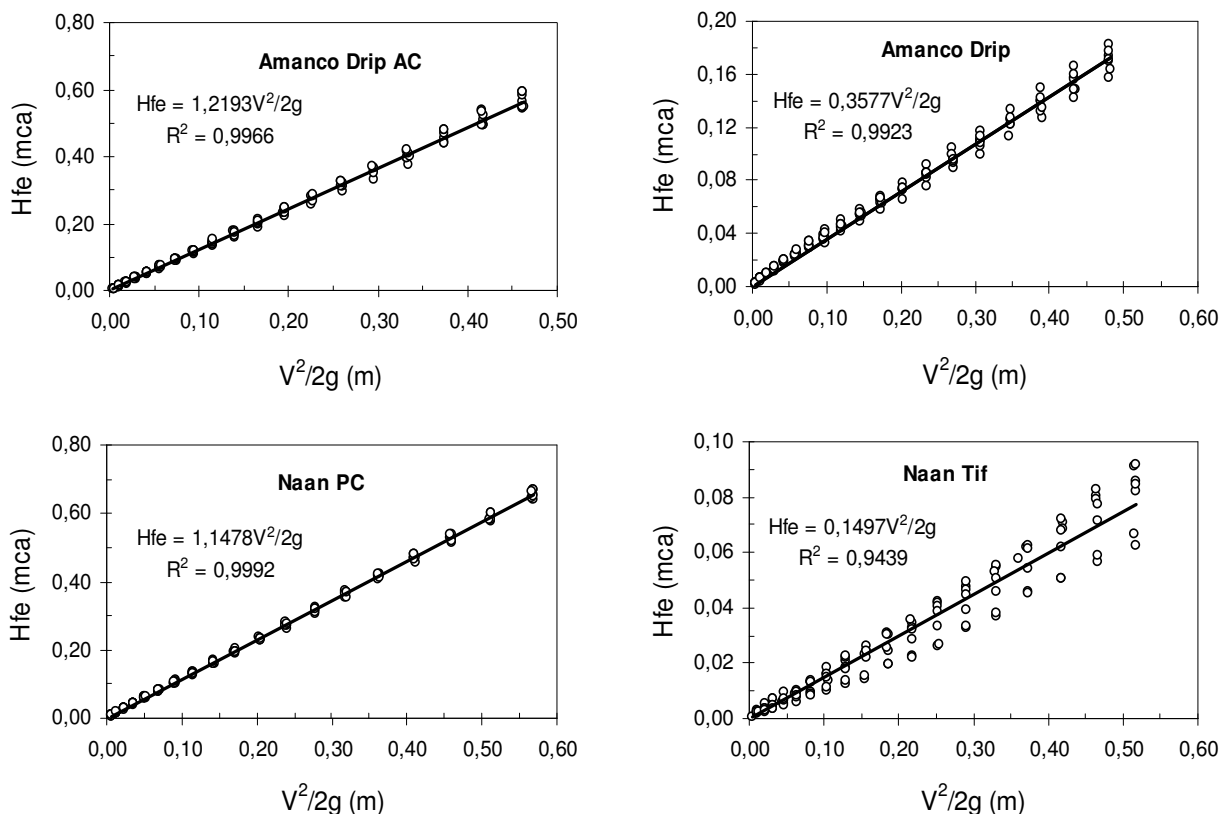


Figura 13 - Perda de carga em função da carga cinética

Utilizando-se, como referência, a vazão de $20 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, cujas velocidades médias da água, em cada tubo emissor, são apresentadas na Tabela 6, verifica-se que o modelo Naan PC apresentou maior perda de carga em relação aos demais modelos, em que os resultados obtidos foram: Naan PC: 0,126 mca; Amanco Drip AC: 0,115 mca; Amanco Drip: 0,035 mca; Naan Tif 0,016: mca.

Observa-se que o emissor Naan Tif apresentou o menor coeficiente de carga cinética ($K = 0,1497$) e o Amanco Drip AC, o maior coeficiente ($K = 1,2193$). Para os emissores Naan Tif, obteve-se maior dispersão dos valores de perda de carga nas amostras analisadas, o que pode ser causado por alguma variabilidade na geometria do emissor. A Tabela 7 mostra a amplitude de variação dos valores de (K) e o intervalo de confiança desses valores a 95% de probabilidade, indicando que existem 95% de probabilidade de esse intervalo conter a verdadeira média. Pode-se observar, na Tabela

7, que os gotejadores autocompensados proporcionaram menor variabilidade no coeficiente K.

Tabela 7 – Valores máximo e mínimo de K para os emissores ensaiados

Emissor	Valores de K da regressão		
	Médio	Amplitude	IC (95%)*
Amanco Drip AC	1,2193	1,1880 – 1,2744	1,2115 – 1,2271
Amanco Drip	0,3577	0,3284 – 0,3848	0,3545 – 0,3612
Naan PC	1,1478	1,1399 – 1,1749	1,1445 – 1,1515
Naan Tif	0,1497	0,1165 – 0,1723	0,1457 – 0,1538

* Intervalo de confiança a 95 %

4.4 Coeficiente de carga cinética, em função do índice de obstrução

O coeficiente de carga cinética (K) depende do número de Reynolds (R) e das características geométricas do elemento obstrutor. No escoamento turbulento, o coeficiente K está mais fortemente relacionado à geometria da seção de escoamento (Azevedo Neto, 1998). Na Figura 14, observa-se que os valores de K, para cada emissor estudado, variaram pouco, com (R) a partir de, aproximadamente, $R > 10\ 000$. Como resultado, pode se considerar que o efeito das forças viscosas é desprezível para $R > 10\ 000$ e K passa a depender, em grande parte, da forma e do tamanho do elemento obstrutor e que um valor médio de K pode ser previsto, a partir de um índice de obstrução (Figura 15).

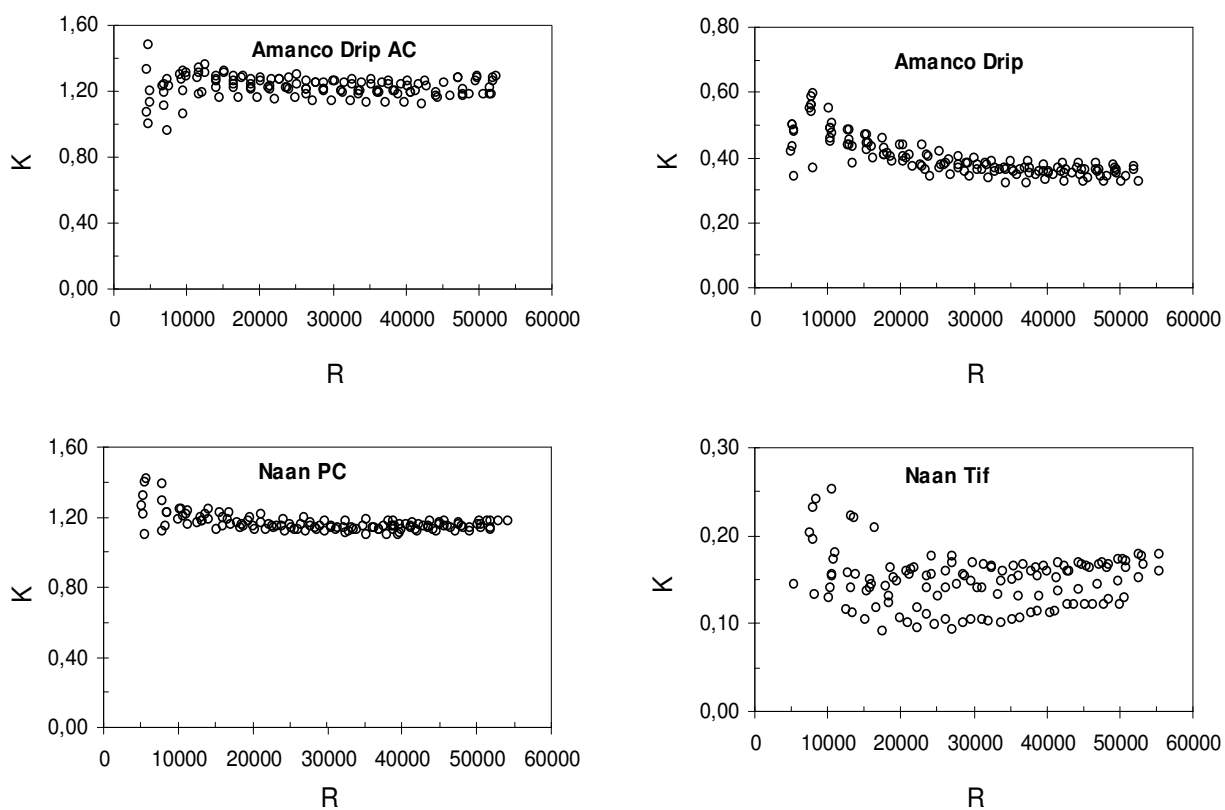


Figura 14 - Valores observados de (K) em função de (R)

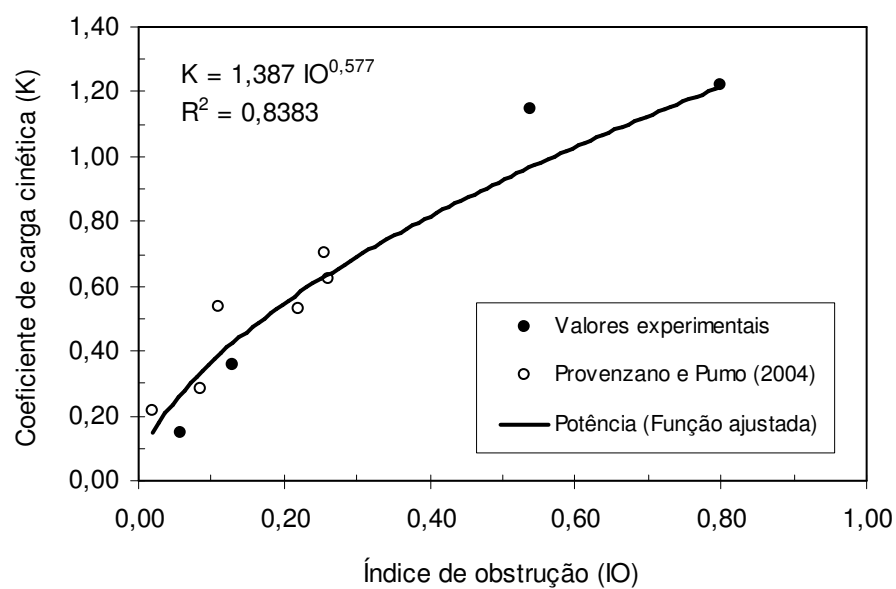


Figura 15 – Relação entre o índice de obstrução e o coeficiente de carga cinética

4.5 Comprimento equivalente

As aproximações para a perda localizada de carga, em termos de comprimento equivalente (Le), possuem validades práticas (JUANA et al. 2002, REDDY, 2003), porém deve ser observado que f varia ao longo da linha lateral com a variação da vazão. Pode também variar em uma lateral específica, em decorrência da variação da pressão de entrada que afeta a vazão de emissores não-autocompensados. Conseqüentemente, Le não é constante para um dado valor de K e nem K é constante para um dado valor de Le .

Entretanto, como critério prático, pode-se assumir um comprimento equivalente constante para cada gotejador igualmente espaçado, expressando-se Le (m) em função de D (m) e Q ($m^3 s^{-1}$) e K , calculado pela relação expressa na Figura 15, o que resulta na eq. (20), obtida com $c = 0,296$:

$$Le = 2,2139 k D^{4,75} Q^{-1,75} \eta^{-0,25} \quad (20)$$

A perda total de carga na linha lateral H_{fte} , considerando o comprimento equivalente para expressar a perda localizada de carga, pode ser obtida multiplicando-se o comprimento da tubulação (L) por um fator λ [eq. (21)]:

$$\lambda = \left(1 + \frac{Le}{Se} \right) \quad (21)$$

em que Se é o espaçamento entre os gotejadores (m).

Assumindo a validade prática da perda localizada de carga, expressa em comprimento equivalente, a perda total de carga na linha de gotejadores pode ser calculada em função da vazão de entrada (Q , em $m^3 s^{-1}$), do diâmetro interno da tubulação (D , em m), do comprimento da tubulação (L_t , em m), do espaçamento entre os gotejadores (Se , em m), do comprimento equivalente (Le , em m), da viscosidade cinemática da água (η , em $m^2 s^{-1}$) e do fator de redução de perda de carga (F) para tubulações com múltiplas saídas.

Na figura 16, apresenta-se uma comparação entre os comprimentos equivalentes obtidos com os dados experimentais e o comprimento equivalente calculado pela eq. (20); nela se pode observar que, para os emissores Amanco Drip AC e Amanco Drip, os valores de L_e , calculados por essa equação, ajustaram-se melhor aos valores observados. Já nos emissores Naan PC e Naan Tif, o modelo apresentou desvios significativos. Para o emissor Naan PC, a eq. (21) subestimou o comprimento equivalente em 25,5% e, para o emissor Naan Tif, superestimou em 60,3%.

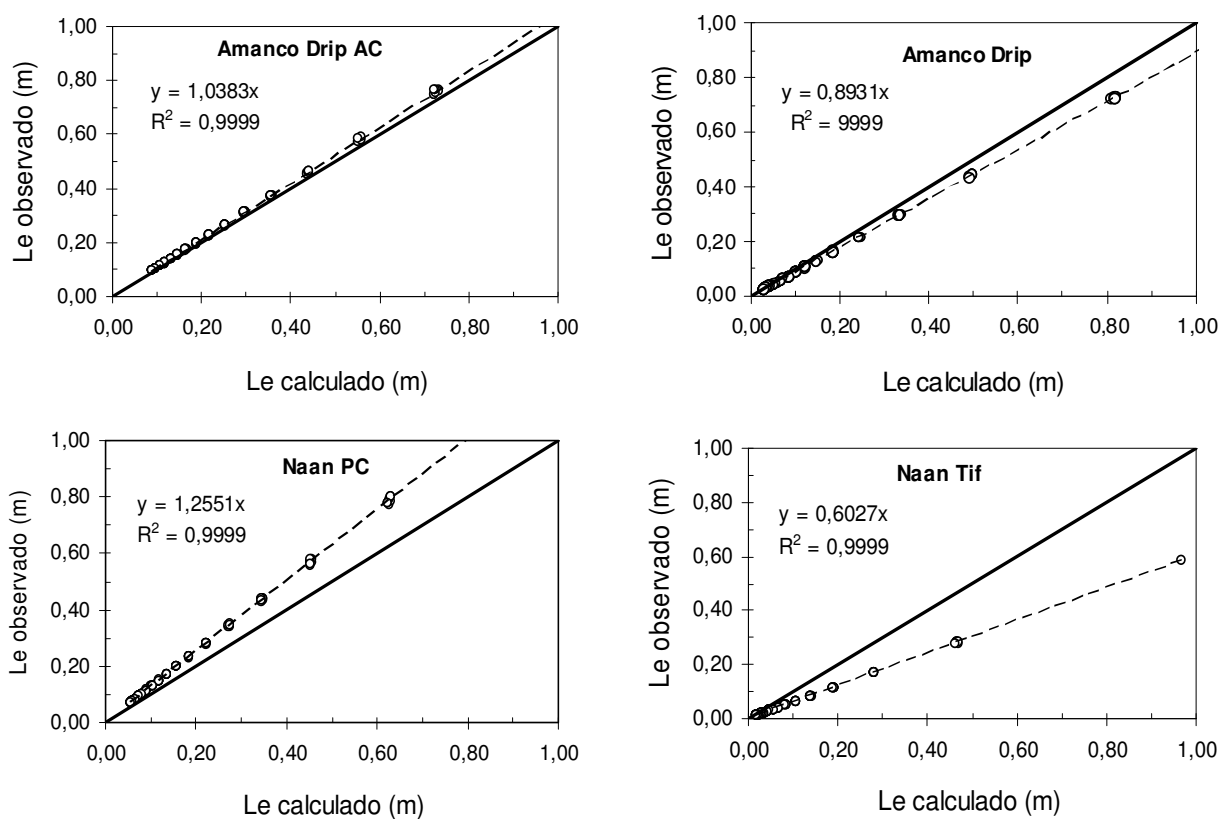


Figura 16 – Comparação entre os comprimentos equivalentes obtidos em ensaios de laboratório e os comprimentos equivalentes calculados para cada emissor pela eq.20

4.6 Aplicação

Para demonstrar a importância da perda localizada de carga em projetos de irrigação, aplicou-se essa consideração para dimensionar o comprimento máximo de uma linha lateral, utilizando-se três procedimentos (Tabela 8) para os tubos gotejadores estudados. Na Tabela 8, apresentam-se a vazão nominal de cada gotejador (q_n), o seu espaçamento na linha lateral (S_e) e a pressão de serviço indicada pelo fabricante (H_s). Para os gotejadores não-autocompensados, considerou-se, como critério de dimensionamento, a variação máxima de vazão de 10%. Para os gotejadores autocompensados, considerou-se a variação máxima de pressão na lateral igual a 200 kPa. Pode-se observar que houve variação da perda localizada de carga nos diferentes emissores e que a consideração dessa perda de carga é importante, especialmente para os gotejadores autocompensados. A desconsideração da perda localizada de carga levou a uma superestimativa do comprimento máximo da linha lateral de até 25,7%, para os gotejadores autocompensados; já para os gotejadores não-autocompensados, a superestimativa foi de, no máximo, 9,5%.

O cálculo da perda localizada de carga, utilizando-se o modelo potencial para estimar o valor de K (procedimento III), mostrou resultados pouco diferentes daqueles obtidos com o valor de K ajustado, com os dados observados em laboratório (procedimento II), o que resultou pequenas variações na estimativa do comprimento máximo da linha lateral nesses dois procedimentos. Em vista de tais resultados, considera-se que a perda localizada de carga, provocada pelos emissores, pode ser estimada satisfatoriamente pelo uso do coeficiente de carga cinética, calculado pelo modelo potencial apresentado na Figura 15.

Tabela 8 – Apresentação dos dados do cálculo de comprimento máximo de uma lateral

Parâmetros	Emissor											
	Naan PC			Amanco Drip AC			Naan Tif +			Amanco Drip ++		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
qn (L h ⁻¹)	3,8	3,8	3,8	4,0	4,0	4,0	3,6	3,6	3,6	4,2	4,2	4,2
Se (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hs (kPa)	100-	100-	100-	100-	100-	100-	100	100	100	100	100	100
	350	350	350	300	300	300						
Hinic (kPa)	300	300	300	300	300	300	110	110	110	110	110	110
Hfim (kPa)	101	102	102	101	101	101	92	92	92	87	87	87
Qe (L h ⁻¹)	1018,4	775,2	798,0	1136,0	844,0	844,0	431,1	417,2	402,8	515,5	466,6	458,4
Hf (mca)	19,9	9,5	10,3	19,9	9,0	9,0	1,8	1,6	1,5	2,2	1,8	1,7
Hfe (mca)	---	10,3	9,5	---	10,9	10,9	---	0,2	0,3	---	0,5	0,6
Hfte (mca)	19,9	19,8	19,8	19,9	19,9	19,9	1,8	1,8	1,8	2,2	2,3	2,3
N	268	204	210	284	211	211	123	118	114	127	115	112
Lmáx (m)	134	102	105	142	105,5	105,5	61,5	59	57	63,5	57,5	56,5
Lvar (%)	---	-	+ 2,9	---	-	0	---	- 4,1	-3,4	---	- 9,5	- 1,7
		23,9			25,7							

+ q = 1,13 H^{0,503}; ++ q = 1,61H^{0,415}

- Procedimento I – sem perda localizada de carga
- Procedimento II – com perda localizada de carga, utilizando o K observado para cada emissor.
- Procedimento III – com o K em função do índice de obstrução (IO) modelo

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada uma alternativa para calcular a perda localizada de carga, provocada por gotejadores coaxiais integrados a tubos de polietileno, em função de relações geométricas entre a área de escoamento através do gotejador e a seção do tubo. Os resultados encontrados possibilitam as conclusões apresentadas a seguir.

Para cada modelo de tubo gotejador, o coeficiente de carga cinética (K) foi praticamente independente do número de Reynolds, para $R > 10\ 000$, sugerindo que a perda localizada de carga em gotejadores coaxiais integrados pode ser caracterizada por um valor médio de K, em função da razão de obstrução. Maior variabilidade dos valores de K ocorreu para os gotejadores não-autocompensados e a maior perda localizada de carga, para os autocompensados.

O aumento do grau de obstrução ($1 - A_g/A_t$) proporcionou o aumento na perda localizada de carga. Considerando a vazão de $20 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, nos tubos gotejadores Amanco, observou-se que o aumento de 1,79 vez no grau de obstrução resultou no aumento de 3 vezes na perda localizada de carga e, nos gotejadores Naandan, o aumento de 2,2 vezes no grau de obstrução proporcionou o aumento de 8,9 vezes na perda de carga.

A consideração da perda localizada de carga é um critério relevante no dimensionamento de linhas laterais de gotejamento, especialmente quando se utilizam gotejadores autocompensados. A desconSIDERAÇÃO da perda localizada de carga levou à superestimativa do comprimento máximo da linha lateral, de até 25,7% para os gotejadores autocompensados e de até 9,5% para os gotejadores não-autocompensados.

O cálculo da perda localizada de carga utilizando-se o modelo potencial para estimar o valor de K, em função do índice de obstrução, mostrou bons resultados, comparáveis àqueles obtidos com o valor de K ajustado pelos dados observados em laboratório, o que resultou em pequenas variações na estimativa do comprimento máximo da linha lateral por esses dois procedimentos. Considera-se que a perda localizada de carga, provocada por gotejadores integrados à linha lateral, pode ser calculada por meio de um coeficiente de carga cinética, calculado em função do índice de obstrução.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO926**: equipamentos de irrigação agrícola – emissores e tubos emissores – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 13p.

AL-MOUND, A I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. **Journal of Agriculture Engineering Research**, Silsoe, v.60, n. 1, p.1-5, 1995.

ALVES, P.R.V. **Análise de um Coeficiente geométrico para estimativa da perda de carga localizada em linhas laterais de irrigação por gotejamento**. 2000. 163 p. Dissertação (Mestrado Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ANDRADE, D.V. **Avaliação hidráulica de tubos flexíveis de polietileno perfurados a laser, utilizados na irrigação**. 1990. 147 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

BAGARELO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimentall study on flow resistance law for small-diameter plastic tipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 121, n.5, p. 313 – 316, 1995.

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

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**.7. ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611p.

BOMBARDELLI, F.A.; GARCÍA, H. Hydraulic design of large-diameter pipes. **Journal of Hydraulics Engineering**, New York, v.129, n. 11, p. 839-846, 2003.

CARDOSO, G.G.G. **Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores sobre tubos de polietileno de pequenos diâmetros**. 2007. 64 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

COELHO, R.D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil**. 2007. 192 p. Tese (Livre-Docência em Irrigação) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

CRISTHOPHIDIS, D. Água: gênese, gênero e sustentabilidade alimentar no Brasil. Brasília, Secretaria de infraestrutura Hídrica / PROÁGUA, 2006. 18p. (Relatório Técnico).

DASBERG, S.; OR, D. **Drip Irrigation**. New York: Springer, 1999. 159p.

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**, Silsoe, v.96, n.4, p. 617-631, 2007.

EVANS, R.G.; WU, I-P.; SMAJSTRALA, A.G. Microirrigation systems. In: HOFFMAN, G.J.; EVANS, R.G.; JENSEN, M.E.; MARTIN, D.L.; ELLIOTT, R.L. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASABE, 2007. cap.17, p.632-683.

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.

GILBERT, R.G.; NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A.; FRENCH, O.F.; ADAMSON, K.C. Trickle irrigation: emitter clogging and other flow problems. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.3, n.3, p.159-178, 1981.

HATHOOT, H.M.; AL-AMOUND, A.I.; MOHAMMAD, F.S. Analysis and design of trickle irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 5, p. 756-767, 1993.

JUANA, L.; RODRIGUES-SINOBAS, L; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. **Journal of irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n .6, p. 376-384, 2002a.

JUANA, L.; RODRIGUES-SINOBAS, L; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. II: Experimental study and validation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.128, n.6, p.385 - 396, 2002b.

KAMAND, F.Z. Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.114, n.2, p.311-323, 1988.

KANG, Y.; NISHIYAMA, S.; CHEN, H. Design of microirrigation lateral on nonuniform slopes, **Irrigation Science**, Amsterdam, v.17, n.1, p.3-14, 1996.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Chapman & Hall, 1990. 625p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.17, n.4, p.878-880, 1974.

KAHLLOWN, M.A.; KEMPER, W.D. Factors affecting success and failure of trickle irrigation systems in Balochistan, Pakista. **Irrigation Science**, Amsterdam, v.1, n.26, p.26-71, 2007.

NAKAYAMA, F.S.; BOMAN, B.J.; PITTS, D.J. Maintenance. In: LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. (Ed.). **Microirrigation crop production**. Amsterdam: Elsevier, 2007. 618p. (Developments in Agricultural Engineering, 13.)

NAKAYAMA, F.S.; GILBERT, R.G.; BUCKS, D.A. Water treatments in trickle irrigation systems. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.104, n.1, p.23-34, 1978.

NETTO, A.; FERNANDEZ, M.F.; ARAUJO, R.; ITO, A.E. **Manual de Hidráulica**, 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1998. 663p.

PALAU-SALVADOR, G.; SANCHIS, L.H.; GONZÁLES-ALTOZANO, P.; ARVIZA-VALVERDE, J. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.132, n.6, p. 522-530, 2006.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. São Carlos: 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.

PROVENZANO, G.; PUMO, D.; DI DIO, P. Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation lateral. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, n.6, p. 525-532, 2005.

RETTORE NETO, O. **Metodologia para determinação da perda de carga localizada em emissores não coaxiais entegrados a tubos de polietileno**. 2008. 61 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

REDDY, K.Y. Evaluation of on-line trickle irrigation emitter barb losses. **Journal of the Institution of Engineers-AG**, Kharagpur, v.84, p.42 - 47, 2003.

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.

SCALOPPI, E.J. Critérios básicos para seleção de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.139, p.54-62, 1986.

SOLOMON, K.; KELLER, J. Trickle irrigation uniformity and efficiency. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.104, n.3, p.293-306, 1978.

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.

SCHWANKL, L.J.; HANSON, B.R. Surface drip irrigation. In: LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. (Ed.). **Microirrigation crop production**. Amsterdam: Elsevier, 2007, 618p. (Developments in Agricultural Engineering, 13.)

SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K. Explicit equations for pipe-flow problems. **Journal of Hydraulics Division**, New York, v. 102, n. 5, p. 657-664, 1976.

TEIXEIRA, M. B. **Efeitos de dosagens extremas de cloro e pH na vazão de gotejadores autocompensantes** (irrigação localizada). 2007. 318 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

TROOEN, T.P.; HILLS, D. Application of biological effluent. In: LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. (Ed.). **Microirrigation crop production**. Amsterdam: Elsevier, 2007. 618p. (Developments in Agricultural Engineering, 13.)

VILELA, L.A.A.; SOCCOL, O.J.; GERVÁZIO, E.S.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. Alteração no diâmetro de tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 182-185, 2003.

VON BERNUTH, R.D. 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.

WU, I.P. An assessment of hydraulics design of micro-irrigation systems. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 32, n. 3, p. 275-284, 1997.

WU, I.P.; GITLIN, H.M. Energy gradient line for drip irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 101, n. 4, p. 323-326, 1975.

YOO, D.H.; SINGH, V.P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 131, n. 8, p. 694-704, 2005.

ZAYANI, K.; ALOUINI, A.; LEBDI, F.; LAMADDALENA, N. Design of drip irrigation systems using the energy drop ratio approach. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, n. 5, p. 1227-1133, 2001.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)