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

**Microaspersor com microtubos: um novo conceito hidráulico na
irrigação localizada**

Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida

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

Piracicaba
2008

Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida
Engenheiro Agrônomo

Microaspersor com microtubos: um novo conceito hidráulico na irrigação localizada

Orientador:
Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

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

Piracicaba
2008

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

Almeida, Ceres Duarte Guedes Cabral de
Microaspersor com microtubos: um novo conceito hidráulico na irrigação localizada /
Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida. - - Piracicaba, 2008.
104 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Hidráulica aplicada 2. Irrigação por microaspersão 3. Microtubos 4. Perda de
carga I. Título

CDD 631.7
A447m

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

Ofereço

Aos meus pais, **Fausto** e **Mireile**, casal referência em minha vida, aos quais Deus confiou a responsabilidade do meu progresso moral, baseado no cumprimento da Lei de Deus, na educação e no amor incondicional.

Às minhas irmãs, **Conciana** e **Cecile**
às quais Deus me reuniu à semelhança dos nossos pensamentos e juntas estaremos, sempre, participando intensamente umas das vidas das outras.

Dedico

Ao meu esposo e melhor amigo, **Brivaldo**, cujo relacionamento é baseado em uma afeição sincera, como a de dois espíritos que se procuraram na multidão e que sob as Bênçãos de Deus mais uma vez se encontraram para enfrentar juntos os degraus da evolução espiritual. E, se assim for Sua vontade, estaremos juntos novamente por muitas encarnações, pois a sintonia existente entre nós me faz acreditar que o resultado será a plena felicidade.

Ninguém pode ver o reino de Deus se não nascer de novo. Se um homem não renasce da água e do Espírito, não pode entrar no reino de Deus. (JOÃO, cap. III, v. 1 a 12.)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida, minha família e por permitir sentir em meu dia-a-dia Sua presença e proteção.

Ao prof. Tarlei, meu mais profundo agradecimento. Na verdade, simples palavras são insuficientes para traduzir meu verdadeiro reconhecimento a todas suas ações exemplares durante esse tempo de convivência.

Ao prof. Frizzone pelos conhecimentos sempre transmitidos com tanto esmero e pela nossa amizade solidificada ao longo deste maravilhoso período que estive na ESALQ.

Aos meus amigos Sérgio Weine e Ana Livia pelo companheirismo e amizade sempre presentes, além do inabalável apoio durante todo curso.

Aos meus amigos de sala na ESALQ, Alexsandro, Miguel Isaac, Wanderley, Rogério, Tadeu, Tiago e Robson pela constante troca de experiência, amizade e incentivo e, especialmente a Antônio pela valiosa contribuição nos desenhos esquemáticos.

Aos colegas de turma Walesca, César, Manoel, Euro, Tales, Adalberto, Fabiana e Hudson pelo convívio profissional e pessoal tão valioso em nossas vidas.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pela liberação de minhas atividades docentes e a CAPES pela concessão da bolsa, através do programa PICDT (Programa Institucional de Capacitação Docente e Técnica).

A ESALQ/USP pela infra-estrutura e suporte financeiro para o pleno desenvolvimento de nossa pesquisa.

Ao CNPq pela bolsa sanduíche concedida, o que viabilizou uma maravilhosa experiência profissional na Austrália.

Ao Prof. Rod Smith, meu orientador australiano, pelo verdadeiro apoio e constante disponibilidade em contribuir significativamente para o aprofundamento das discussões deste trabalho.

A empresa PLASNOVA Louveira Ind. Com. Ltda pela doação dos microtubos utilizados neste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ, pelas aulas que fundamentaram minha formação acadêmica, bem como, pela amizade presente no cotidiano tornando-se uma característica do nosso departamento.

Aos Funcionários do Departamento de Engenharia Rural pela constante boa vontade e disposição em solucionar todos os nossos problemas, Sr. Hélio, Sr. Antônio, Luis, Gilmar, Osvaldo, Davilmar, Beatriz, Sandra, Lúcia e Vanda.

Aos funcionários da Divisão de Biblioteca e Documentação, especialmente na Biblioteca Central, nas pessoas de Airton, Eliana, Silvia e Vilma, pela dedicação amorosa ao trabalho com permanente bom humor e excepcional qualidade de trabalho.

A todos os pós-graduandos que conheci ao longo deste período, tanto no Programa de Irrigação e Drenagem, como também de Entomologia, Genética, Solos, Produção Vegetal e Física do Ambiente Agrícola, pelos diálogos fortalecedores principalmente nos momentos de lazer.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
Referências	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Agricultura Irrigada	17
2.2 Hidráulica de Microaspersor	18
2.3 Uso de Microtubos na Irrigação Localizada	20
2.4 Hidráulica de Microtubos	21
2.5 Dimensionamento de Linhas Laterais	25
2.6 Avaliação de sistemas de irrigação e do desempenho do emissor	27
2.7 Informática na agricultura	31
Referências	31
3 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DE MICROTUBOS POR METODOLOGIA HIDRODINÂMICA	37
Resumo	37
Abstract	37
3.1 Introdução	38
3.2 Material e Métodos	40
3.3 Resultados e Discussão	44
3.3.1 Ensaios para determinação do diâmetro interno dos microtubos	44
3.3.2 Ensaios para determinação do diâmetro do tubo usado na linha lateral	47
3.4 Conclusões	48
Referências	48
4 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DOS MICROTUBOS UTILIZADOS NA IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO	51
Resumo	51
Abstract	51
4.1 Introdução	52
4.2 Material e Métodos	53

4.3 Resultados e Discussão	59
4.3.1 Cálculos preliminares ao ensaio.....	59
4.3.2 Equações características dos emissores	60
4.3.3 Relação comprimento-pressão	63
4.3.4 Análise teórica do modelo proposto.....	64
4.4 Conclusões	66
Referências	66
5 DESENVOLVIMENTO DO DEFLETOR PARA O MICROASPERSOR	69
Resumo	69
Abstract	69
5.1 Introdução	70
5.2 Material e Métodos	72
5.3 Resultados e Discussão	75
5.4 Conclusões	79
Referências	80
6 AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DA VAZÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO COM MICROTUBOS.....	81
Resumo	81
Abstract	81
6.1 Introdução	82
6.2 Material e Métodos	85
6.3 Resultados e Discussão	90
6.4 Limitações das equações empíricas	94
6.5 Conclusões	96
Referências	97
ANEXOS	99

RESUMO

Microaspersor com microtubos: um novo conceito hidráulico na irrigação localizada

O microtubo é um emissor simples, de baixo custo, com a grande vantagem de melhor adaptação em condições de topografias onduladas e montanhosas, onde a pressão na linha lateral varia consideravelmente. Este estudo constitui a elaboração de um modelo para dimensionamento hidráulico de microaspersores, cujo emissor é um microtubo de tamanho variável. O fundamento teórico do estudo baseia-se na premissa da compensação da perda de carga na linha lateral e das diferenças topográficas do terreno, através da variação do comprimento do microtubo. Os objetivos específicos deste trabalho foram: determinar as características hidráulicas do microtubo; desenvolver um modelo para dimensionamento do sistema de irrigação proposto e sugerir um defletor para o microaspersor; avaliar a uniformidade de vazão ao longo de linhas laterais experimentais em declive e desenvolver uma planilha eletrônica, para dimensionamento de microtubos. Dois microtubos de diferentes diâmetros foram utilizados neste estudo. Entre as características hidráulicas determinadas, estão o diâmetro interno real, relação vazão-pressão e pressão-comprimento. A determinação do diâmetro interno médio dos microtubos foi realizada em laboratório através da medida de fluxo sob regime laminar e pelo projetor ótico de perfil. Uma equação resultante da combinação das equações de energia desenvolvida por Bernoulli e Darcy-Weisbach além da equação de Hagen-Poiseuille para cálculo do fator de atrito (f), foi deduzida para cálculo do diâmetro. Uma bancada de ensaios foi montada para realização dos ensaios. Os experimentos foram realizados numa faixa de número de Reynolds entre 8000 e 17000, portanto regime de escoamento turbulento. A equação de Darcy-Weisbach foi utilizada para cálculo da perda de carga total e a equação de Blasius foi utilizada para cálculo do fator de atrito (f). Duas laterais foram dimensionadas e instaladas em diferentes declividades (0,5 e 2,3 %). Medidas de dispersão foram utilizadas para avaliar e classificar o sistema de irrigação. Dois modelos de defletores foram desenvolvidos em laboratório, e avaliados em termos de distribuição espacial da água e facilidade construtiva. A análise dos resultados experimentais foi realizada em bases empíricas e teóricas. A avaliação hidrodinâmica do diâmetro dos microtubos aproximou-se muito da determinação através do projetor ótico de perfil, o que indica ser uma alternativa viável para o dimensionamento. A estimativa da pressão de operação do microaspersor baseada nas equações propostas foi bem próxima à pressão observada. O modelo empírico estimou o comprimento do microtubo em função da pressão com bastante precisão, consequentemente a uniformidade de vazão ao longo da lateral foi classificada como excelente em ambas as situações de declive, com coeficientes superiores a 95 %. Uma análise de sensibilidade para estimar as implicações no desempenho hidráulico do sistema, dos erros ou das mudanças nas variáveis envolvidas no dimensionamento, mostrou que o desempenho do emissor é extremamente sensível ao diâmetro do microtubo. Baseado nos resultados obtidos com os ensaios de distribuição pode-se afirmar que é necessário um maior aprofundamento no projeto do defletor do microaspersor. Em geral, a metodologia proposta oferece a possibilidade de ajustar quaisquer variações na carga de pressão ou na topografia do terreno e assim, obter vazão constante ao longo da linha lateral.

Palavras-chave: Hidráulica; Perda de carga; Uniformidade de distribuição; Darcy-Weisbach; Blasius

ABSTRACT

Micro-sprinkler with microtube emitters: a new trickle irrigation hydraulic concern

The microtube is a simple and cheap emitter which has advantage of be suitable for undulating and hilly conditions, where pressure in the lateral line varies considerably. This study aims to develop an empirical approach to the design of a novel micro-sprinkler that uses microtube as the emitters whose length is variable. The theoretic concern is the irrigation system should be designed to compensate variations along lateral line as a function of the friction loss and elevation. General objectives were: hydraulic characterization of the microtube; empiric equations to design; to develop a kind of deflector; to evaluate application uniformity for micro-sprinkler and to do a worksheet to design this system. The relationship between discharge, pressure, and length for microtube emitters of two different diameters were done. The diameter was measured based on flow measurements under laminar flow condition and by accurate optical equipment. Combination of the energy (Bernoulli) and Darcy-Weisbach equations and Hagen-Poiseuille equation (friction factor laminar flow) gives the diameter. A test table to do tests was built. The range of Reynolds numbers during the experiment was 8,000 to 17,000, then turbulent flow. The friction head losses were calculated using the Darcy-Weisbach equation and the friction factor by Blasius equation. Two experimental lines were designed and laid on different slopes (0.5 % and 2.3 %). To evaluate the uniformity of application of water, dispersion measures are used. Two deflectors were created and tested in the laboratory by spatial distribution analysis and easily to manufacture. The data was analyzed by theoretical and empirical approaches. The diameter values of the microtubes were very close to those by optical equipment, then it is a good alternative method to determinate the diameter of the microtube. The pressure observed values were very close to estimated. The empirical approach determined the length required for the microtube emitters with high accuracy, consequently the flow rate uniformity along lateral line was excellent for both laterals, their uniformity coefficients were above 95%. A sensitivity analysis to estimate the implications of errors or changes in key variables on the hydraulic performance of this system showed that the emitter performance is particularly sensitive to the emitter diameter. The deflector tests results showed low spatial uniformity, so we can say that it is necessary more studies at this part of this micro-sprinkler. Finally, the methodology proposed allow adjust any head pressure or elevation variations to high uniformity along of lateral line.

Keywords: Hydraulic; Head loss; Distribution uniformity; Darcy-Weisbach; Blasius

1 INTRODUÇÃO

A produtividade agrícola em áreas irrigadas depende de uma série de fatores, dentre eles, o dimensionamento e manutenção dos sistemas de irrigação. Aplicações excessivas ou insuficientes de água prejudicam o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, a produtividade e a rentabilidade do agricultor, além das características físico-químicas do solo.

O uso racional dos recursos naturais solo e água, potencialmente utilizáveis, representa um grande desafio em termos de planejamento. Em regiões onde estes recursos são escassos, como por exemplo, no nordeste do Brasil, sua utilização possui ainda maior importância diante dos problemas existentes e dos muitos fatores envolvidos. Nesta região encontram-se reservatórios de água subutilizados e elevada concentração de pequenas propriedades (menores que 100 ha) sub-exploradas. Este aspecto implica na necessidade de geração, adaptação e introdução de tecnologias que se adéquem as condições do meio, e que sejam capazes de, em consonância com a cultura e condições financeiras do produtor rural, efetuar mudanças na base da produção agrícola regional (SILVA; BRITO; AZEVEDO, 1988).

A irrigação localizada constitui o método de irrigação em que a água é aplicada diretamente sobre a região radicular, em pequena intensidade e alta frequência, com possibilidade de manter a umidade próxima da ideal, ou seja, na capacidade de campo. Gotejamento e microaspersão são os sistemas mais difundidos de irrigação localizada, inclusive no Brasil. A distribuição de água pelos sistemas de irrigação localizada é influenciada pela variação de pressão ao longo das tubulações, interferência do vento durante as irrigações, no caso da microaspersão, como também pelo entupimento de emissores, no caso do gotejamento.

A microaspersão apresenta vantagens inerentes ao sistema, especialmente a otimização do uso dos recursos naturais. Em comparação ao gotejamento, podemos citar como principais vantagens a menor dificuldade de obstrução de emissores, maior raio molhado, fácil visualização de emissores entupidos, melhor adaptação às culturas de maior espaçamento e de grande extensão do sistema radicular, como citrus, banana, manga, entre outras frutíferas. Além disso, deve-se dar preferência à microaspersão em vez do gotejo em solos muito impermeáveis, sob pena de não se obter o bulbo úmido necessário para as culturas (PIZARRO CABELLO, 1996).

Uma restrição de seu uso é o elevado custo de implantação, principalmente em países em desenvolvimento, onde o acesso à tecnologia ainda está limitado pelo aspecto financeiro. No Brasil, o agricultor dispõe de conjuntos de irrigação de elevado custo, com sofisticados equipamentos de controle com automação e quimigação. Para minimizar os custos destes sistemas, pesquisas vêm sendo desenvolvidas buscando alternativas mais acessíveis, sem reduzir a eficiência (SILVA; BRITO; AZEVEDO, 1988; SOUZA, 2005). A redução de custos de operação e com equipamentos é imprescindível para que os projetos sejam economicamente viáveis e executados corretamente. O uso de microtubos é uma destas alternativas, pois sempre despertou o interesse de muitos produtores, justamente por ser um equipamento de baixo custo, fácil manuseio e elevada eficiência.

Pode-se afirmar que o microtubo é o mais antigo gotejador de longo percurso existente. Atualmente no mercado encontram-se microtubos do tipo espaguete com diâmetros interno variando de 0,6 a 1,5 mm. A irrigação localizada com microtubos tem funcionado até mesmo com o uso apenas sob força da gravidade, pois o mesmo opera sob baixas pressões de serviço. Por outro lado, o regime de escoamento, naturalmente laminar neste sistema sofre uma grande influência da temperatura da água e da pressão de alimentação, assim, torna-se necessário o monitoramento das mesmas (SOARES, 1981; SOUZA, 2005). Esta influência deve-se ao fato do aumento da temperatura diminuir a viscosidade dinâmica da água e aumentar o número de Reynolds, conseqüentemente diminuir o coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weisbach e aumentar a vazão (PIZARRO CABELLO, 1996).

Tibau (1976) afirma que o uso de microtubos permite, em situação de aclave ou declive, compensar a perda de carga variando seu comprimento, uma vez que a vazão é proporcional ao comprimento. Por este motivo Pizarro Cabello (1996) comenta que na Espanha os microtubos tornaram-se muito popular. Souza e Botrel (2004) consideram que estes gotejadores são fáceis de serem instalados e possuem um baixo custo de confecção e instalação quando comparados aos outros tipos de gotejadores. E segundo Silva, Brito e Azevedo (1988) sistemas de irrigação por gotejamento com microtubos podem obter razoáveis níveis de uniformidade de distribuição de água quando bem dimensionados, por isso, a importância de se determinar experimentalmente as características hidráulicas dos microtubos e distribuição de pressão ao longo da linha, destacadas por Pizarro Cabello (1996) e Soares et al. (1982).

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo desenvolver um novo conceito hidráulico na irrigação por microaspersão, visando redução do custo com máxima eficiência, através do desenvolvimento e avaliação de um microaspersor que utiliza microtubos como emissores. A teoria do modelo consiste em variar o comprimento do microtubo em função da pressão no ponto de inserção, de modo que se obtenha a vazão desejada e uniforme ao longo da linha lateral de irrigação. Assim, o emissor proposto é equivalente ao autocompensante comercial, pois fornece vazão constante. Para atingir o objetivo geral foram relacionados os seguintes objetivos específicos:

- determinar as características hidráulicas do microtubo: diâmetro interno, equação que representa a relação vazão-pressão e pressão-comprimento.
- desenvolver um modelo para dimensionamento do sistema de irrigação por microaspersão com microtubos.
- desenvolver um anteparo para o microaspersor de modo que possibilite a distribuição espacial de água do emissor.
- avaliar uniformidade de vazão, em campo, ao longo da linha lateral experimental.
- desenvolver uma planilha eletrônica, para dimensionamento de microtubos, com base no modelo desenvolvido.

Referências

PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF):** goteo, microaspersión, exudación. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.

SILVA, P.J.C.; BRITO, R.A.L.; AZEVEDO, H.M. Caracterização hidráulica de linhas laterais em sistemas localizados, utilizando microtubos de tamanho variado como emissores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABID, 1988. v. 1, p. 473-505.

SOARES, A.A. **Características hidráulicas de microtubos Cipla e linhas laterais para irrigação por gotejamento.** 1981. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1981.

SOARES, A.A.; BERNARDO, S.; LOUREIRO, B.T.; CONDÉ, A.R. Características hidráulicas de microtubos “ciplá” e de linhas laterais para irrigação por gotejamento. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 10, n. 1, p. 5-9, set. 1982.

SOUZA, R.O.R.M. **Modelagem, desenvolvimento de software para dimensionamento, e avaliação de sistemas de irrigação localizada por gotejamento com microtubos**. 2005. 100 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOUZA, R.O.R.M.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Agriambi**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 16-22, jan./abr. 2004.

TIBAU, A.O. **Técnicas modernas de irrigação**: aspersão, derramamento, gotejamento. São Paulo: Nobel, 1976. 225 p.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agricultura Irrigada

Com o conhecimento atual dos recursos de solo e água, o Brasil tem um potencial de irrigação de 52 milhões de hectares. A área atualmente irrigada atinge 3,0 milhões de hectares, sendo 1,4 milhões de hectares com irrigação pressurizada e 1,6 milhão de hectares com irrigação por superfície. A área irrigada no Nordeste é de 495.370 ha e a área potencial de irrigação é de 2.717.820 ha. Têm-se desenvolvido apenas 18,2% da área potencial. A maior concentração de área irrigada está nos Estados da Bahia (33,95%), Pernambuco (17,97%) e Ceará (16,63%) (HEINZE, 2002).

A irrigação na agricultura deve ser entendida não somente como um seguro contra secas ou veranicos, mas como uma técnica que dê condições para que o material genético expresse em campo todo o seu potencial produtivo (HERNANDEZ, 2004). Além disso, quando bem dimensionada e manejada, a irrigação é uma ferramenta muito eficaz no aumento da rentabilidade do produtor e da oferta de produtos agrícolas, permitindo a racionalização de insumos (água, fertilizantes, energia, etc.). Outro ponto extremamente relevante é a melhoria da qualidade de vida do produtor rural, uma vez que esta técnica promove transformação social no meio rural com a geração de novos empregos. Conseqüentemente, a tecnologia de irrigação com elevado nível minimiza o risco representado pela escassez de água. Considerando a utilização dos recursos naturais nas regiões semi-áridas é possível utilizar os solos durante todo o ano, obtendo-se assim mais de uma colheita por ano (MATOS et al., 1999; HEINZE, 2002).

O uso da irrigação localizada tem se tornado um dos métodos de irrigação mais populares, especialmente em áreas onde a água é um recurso escasso. Basicamente consiste na aplicação de água em solos agricultáveis através de emissores visando umedecer apenas uma porção do solo na base da planta. Existem muitos tipos de emissores, dentre os quais, podemos citar microtubos, microaspersores, gotejadores, tubos porosos, etc. As linhas laterais contendo os emissores formam subunidades de irrigação e normalmente são compostas por tubos de polietileno com diâmetro de 12 a 32 mm ou PVC com diâmetro entre 20 e 80 mm. Em geral têm-se recomendado laterais com apenas um diâmetro para simplificar a instalação e manutenção. Pode-se considerar

que este método de irrigação é um dos que mais economizam água, desde que, corretamente dimensionado, instalado e com adequada manutenção (ISHAQ; IBRAHIM, 1995). Esses sistemas caracterizam-se ainda, por aplicar água filtrada na zona radicular das culturas (mínimo de 25% das raízes), em pequenas intensidades, porém com alta frequência, de modo que se mantenha a umidade do solo ao nível da capacidade de campo ou próximo dela. No entanto, este método de irrigação pode ser fortemente afetado pelo nível de qualificação do irrigante.

Os sistemas de irrigação localizada são de grande importância no cenário agrícola brasileiro, com aplicações voltadas principalmente para a fruticultura, horticultura e fertirrigação. Geralmente, esses sistemas são mais utilizados em culturas perenes que apresentam maior espaçamento entre plantas e entre fileiras. Keller e Karmeli (1974) citam a possibilidade de fertilizar a água e aplicar apenas em um volume de solo ocupado pelo sistema radicular das plantas. Incluem-se na categoria irrigação localizada ou microirrigação, como é denominado por alguns autores, os sistemas de gotejamento e microaspersão. A irrigação localizada possui o grande diferencial entre os demais métodos de irrigação, o eficiente uso da água. Este método de irrigação objetiva prover cada planta com uma contínua quantidade de água necessária para suprir a demanda por transpiração.

2.2 Hidráulica de Microaspersor

Na microaspersão, a água é aspergida em pequenos círculos ou setores, na área de projeção da planta, cuja condução é feita por rede de tubos que operam a baixas pressões, porém superiores às do gotejamento. Assim como as vazões, que variam de 20 - 120 L h⁻¹, as áreas molhadas por cada microaspersor também são superiores à do gotejador (OLITTA, 1986).

A quantidade de água aplicada e a uniformidade de distribuição pelos emissores são informações importantes para o dimensionamento e manejo racional de um sistema de irrigação localizada. Neste sistema, a uniformidade de aplicação de água ao longo da linha lateral está intimamente relacionada com a variação de vazão dos emissores. Esta variação é consequência das perdas de energia pelo atrito e pelas inserções dos emissores, com o ganho ou perda de energia devido à topografia da superfície do solo e com a qualidade da matéria prima e dos processos de fabricação dos emissores (KELLER; KARMELI, 1974).

Em qualquer sistema de irrigação, o conhecimento das características hidráulicas de seus componentes é essencial para seu correto dimensionamento. As características hidráulicas de emissores na irrigação localizada constituem-se em definir: a relação entre vazão e pressão na entrada do emissor; a perda de carga localizada com a sua inserção no tubo; o regime de escoamento nele existente; na uniformidade de fabricação; a grandeza do raio efetivo e a uniformidade de distribuição espacial da água. O conhecimento das características hidráulicas de um emissor permite sua adaptação em diferentes condições, bem como a introdução de mudanças em sua construção (KARMELI, 1977). Para que esse tipo de sistema de irrigação seja corretamente dimensionado, faz-se necessário o conhecimento dessas características, já que o emissor é um dos seus componentes mais importantes, aplicando a água pontualmente no solo, no caso de irrigação por gotejamento, ou aspergindo-a no ar, no caso da irrigação por microaspersão (PAES, 1985; SOARES et al., 1982).

As características do fluxo do emissor são geralmente descritas através da relação entre vazão e pressão, como também pelo expoente da vazão o qual caracteriza o fluxo (KARMELI, 1977). A vazão do emissor, de acordo com Keller e Karmeli (1974), pode ser representada pela eq. (1). Quanto menor o valor de x , menos a vazão é influenciada pelas variações de pressão. Segundo Pizarro Cabello (1996) um emissor perfeito teria o expoente $x = 0$ (autocompensante), os de regime laminar $x = 1,0$ e nos de regime turbulento $x < 1,0$. Já Keller e Karmeli (1974) consideram de regime laminar os emissores com expoente $x = 1,0$ e de regime turbulento os com $x = 0,5$ e Karmeli (1977) comenta que os emissores de longo percurso podem ter valores de x que variem de 0,5 a 1,0.

$$q = k.H^x \quad (1)$$

em que:

q = vazão do emissor, $L\ h^{-1}$;

k = constante de proporcionalidade que caracteriza cada emissor;

H = pressão de serviço do emissor, m ;

x = expoente que é determinado pelo regime de escoamento do emissor.

Na irrigação, a condução de água se processa, em geral, em movimento permanente e uniforme, sob um regime de escoamento turbulento, com exceção na irrigação por gotejamento,

onde o regime de escoamento pode ser laminar. O critério utilizado para se determinar o regime de escoamento é através do número de Reynolds, o qual indica o grau de turbulência do movimento. O número de Reynolds é determinado pelo diâmetro da seção transversal do tubo e a vazão, através da seguinte expressão (KARMELI, 1977; AZEVEDO NETO et al., 2005):

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (2)$$

em que:

Re = Número de Reynolds, adimensional;

V = Velocidade da água, m s^{-1} ;

D = Diâmetro da tubulação, m;

ν = Viscosidade cinemática da água, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

A classificação do regime de escoamento em função do número de Reynolds é baseada nos seguintes intervalos:

$Re \geq 4000$, Regime turbulento

$4000 > Re > 2000$, Regime de transição

$Re \leq 2000$, Regime laminar

A influência da temperatura sobre a vazão dos microtubos reduz com o aumento do número de Reynolds (SOARES et al., 1982), conseqüentemente a faixa onde o regime de escoamento é turbulento possui a vantagem de ser menos sensível às influências das variações de temperatura na água, bem como da variação de pressão na tubulação.

2.3 Uso de Microtubos na Irrigação Localizada

O microtubo é o mais conhecido tipo de gotejador, é também chamado de espaguete e foi um simples e barato emissor muito utilizado em todo mundo no início da irrigação localizada. Trata-se de um tubo de polietileno de pequeno diâmetro (0,6 – 1,5 mm), cujo comprimento pode ser ajustado de acordo com a pressão no ponto de inserção do microtubo na linha lateral. Os microtubos têm sido utilizados predominantemente como gotejador de longo percurso desde a

década de 70 (KENWORTHY, 1972; WU; GITLIN, 1973; BUCKS; MYERS, 1973; KARMELI, 1977; KHATRI et al., 1979). As maiores desvantagens dos microtubos são a alta sensibilidade à variação de temperatura e pressão, além da susceptibilidade ao entupimento, sendo este um dos fatores preponderantes para seu desuso ao longo do tempo. Emissores menos exigentes em mão-de-obra na instalação e mais resistentes a danos mecânicos tornaram-se predominantes no mercado. No entanto, Pizarro Cabello (1996) comenta que na Espanha a popularidade dos microtubos deve-se não somente ao seu baixo custo, mas também por uma peculiaridade interessante: o agricultor pode uniformizar as vazões, mesmo o sistema estando instalado, cortando o emissor no comprimento que se mostre adequado. Outro fator que tem influenciado no seu retorno ao mercado da irrigação é o fato de que a tecnologia de filtragem de água tem evoluído bastante nas últimas décadas. Além disso, os microtubos são especialmente indicados para locais onde existem grandes diferenças de pressão devido a desníveis da topografia e a grandes perdas de carga, ou seja, em locais onde a pressão ao longo da linha lateral varia bastante. Portanto, o grande desafio para o projetista de um sistema de irrigação são as mudanças na vazão em função das variações na carga de pressão do emissor.

Souza, Pérez e Botrel (2006) avaliando o uso da irrigação localizada por gravidade com microtubos na cultura da alface, obtiveram uma uniformidade de distribuição de 97 %, o que indica ótimo desempenho do uso de microtubos como gotejador de longo percurso, segundo Bralts (1986).

No Brasil existe um grande potencial para o desenvolvimento desta técnica, para isto é necessária a realização de estudos locais que identifiquem em quais condições ela pode ser utilizada e quais são as dificuldades técnicas, operacionais e econômicas decorrentes de sua utilização.

2.4 Hidráulica de Microtubos

O microtubo dissipa energia ao longo de seu comprimento, liberando uma quantidade pequena de água para irrigação. O seu comprimento e diâmetro podem ser selecionados para diferentes vazões, possibilitando utilizá-lo como emissor (KENWORTHY, 1972). A vazão uniforme em todos os microtubos ao longo de uma linha lateral está relacionada ao ajuste do

comprimento para aumentar a perda de carga devido à fricção, e assim obter iguais energias de velocidade, conseqüentemente têm-se vazões iguais (ISHAQ; IBRAHIM, 1995). Tradicionalmente estudos da hidráulica de microtubos têm sido feitos sob regime laminar (KHATRI et al., 1979; ISHAQ; IBRAHIM, 1995; SOUZA; BOTREL, 2004). Existem poucos trabalhos nos quais os experimentos foram realizados com microtubos sob regime de escoamento turbulento (KHATRI et al., 1979; BHATNAGAR; SRIVASTAVA, 2003).

A perda de carga total dos microtubos pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach com a equação de Blasius (eq. 3) para cálculo do fator de fricção (f) determinada empiricamente para tubos lisos com fluxo turbulento. A relação f-Re para microtubos com diâmetro inferior a 4 mm é similar aquele com diâmetro maior. A curva que representa hidraulicamente tubos lisos ou a equação de Blasius pode ser usada com razoável precisão para determinar o coeficiente de fricção sob condição de fluxo turbulento na faixa de $3000 < Re < 100000$ (KHATRI et al., 1979; BERNUTH; WILSON, 1989). Frizzone et al. (1998) não encontraram diferenças significativas, a 5 % de probabilidade, ao compararem os valores da perda de carga determinados experimentalmente e ajustados por análise de regressão de um tubo gotejador, com os valores obtidos pela equação de Darcy-Weisbach e com f determinado pela equação de Blasius, resultado este que ratifica o uso destas equações com relativa segurança.

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (3)$$

Khatri et al. (1979) realizaram um estudo sobre hidráulica de microtubos e determinaram equações que representam a perda de carga total em diversas condições de regime de escoamento (eq. 4, 5 e 6). Estas equações correlacionam vazão, comprimento, pressão na entrada do microtubo e diâmetro, conseqüentemente estimam com precisão a vazão do microtubo. Os referidos autores consideram neste trabalho, que as perdas localizadas podem ser negligenciadas no regime laminar.

- Equação para regime laminar:

$$H = 0,0074 \frac{Q^{1,253}}{\phi^{3,361}} L \quad (4)$$

- Equação para regime de transição:

$$H = 0,0034 \frac{Q^{1,665}}{\phi^{4,190}} L \quad (5)$$

- Equação para regime turbulento:

$$H = 0,0036 \frac{Q^{1,779}}{\phi^{4,857}} L \quad (6)$$

em que:

H = perda de carga total, m;

ϕ = diâmetro do microtubo, mm;

Q = vazão do emissor, L h⁻¹;

L = comprimento do microtubo, cm.

No entanto, a equação de Colebrook-White (eq. 7) tem sido reconhecida como a que melhor representa a lei de resistência ao escoamento devido sua elevada precisão e fundamentação teórica (BERNUTH; WILSON, 1989). Conseqüentemente, esta vem sendo utilizada como padrão referencial no cálculo do fator de atrito (f) em situações de regime de escoamento turbulento em tubos comerciais. Nesta equação, a grandeza f está presente nos dois membros da equação, então é necessário utilizar um processo iterativo para solucioná-la, o que não representa grandes dificuldades, atualmente, em função dos recursos computacionais disponíveis.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

em que:

k = rugosidade da parede do tubo, m;

D = diâmetro do tubo, m.

Existem numerosas equações explícitas para o fator de atrito que foram propostas por diversos pesquisadores, algumas dimensionalmente não homogêneas e/ou com elevados desvios (erro) comparando-se com a Colebrook-White. Dentre estas, a equação de Barr (eq. 8) (CHADWICK; MORFETT; BORTHWICK, 2006) é uma alternativa conveniente, uma vez que o

fator de atrito está explícito e pode ser facilmente calculado sem a necessidade de métodos iterativos, além disso, o desvio em relação à equação padrão é bem reduzido, em torno de 0,4 % (CAMARGO, 2001).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,15}{\text{Re}^{0,892}}\right) \quad (8)$$

Watters e Keller (1978) sugeriram que o fator de atrito para tubos de polietileno utilizados na linha lateral da irrigação localizada é mais bem descrito pela curva de tubos lisos no diagrama de Moody e que, pode ser calculado com relativa precisão através da equação de Blasius (eq. 3), cujo resultado é uma reta na escala logaritma do diagrama de Moody. Bernuth e Wilson (1989) também encontraram elevada precisão no cálculo do f com a equação de Blasius ao realizarem experimentos com tubos de polietileno com diâmetros de 14, 16 e 26 mm, considerando apenas a faixa na qual o número de Reynolds fosse inferior a 10^5 .

No entanto, ao se desconsiderar a rugosidade da parede do tubo, tanto a equação de Barr como de Colebrook-White representa melhor a curva para tubos lisos. Desta forma a equação de Colebrook-White é reescrita conforme a eq. (9):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}}\right) \quad (9)$$

Khatri et al. (1979) estudando microtubos com 0,8 a 4,0 mm de diâmetro encontrou experimentalmente valores do fator de atrito inferiores àqueles calculados pela equação de Blasius (ou equação para tubos lisos), quando foi considerada a perda de carga localizada. Neste trabalho, eles desenvolveram equações empíricas relacionando hf , Q e D , tanto para fluxo laminar como para turbulento. No entanto, seus dados para faixa de escoamento laminar não se ajustaram a uma reta no diagrama de Moody. Este fato sugere que existe alguma variável estimada erroneamente, como por exemplo, o diâmetro interno dos microtubos que pode ser responsável pelos valores de f menores que o esperado. Resultados semelhantes foram encontrados por Bagarello et al. (1995) ao investigarem a lei de resistência ao escoamento, em tubos de polietileno com diâmetros maiores (16, 20 e 25 mm), através de modelos empírico e semi-teórico. Os valores do fator de atrito também foram inferiores aos da curva para tubos lisos na faixa de escoamento turbulento, entretanto, em menor grau que Khatri et al. (1979). Bagarello et al. (1995) propuseram uma relação semelhante à equação de Blasius, no entanto com o valor do numerador reduzido:

$$f = \frac{0,302}{Re^{0,25}} \quad (10)$$

Cardoso, Frizzone e Rezende (2008) propuseram uma relação similar, com o valor do numerador da eq. (10) igual a 0,300, para a faixa de Re entre 5000 a 68000 e tubos de polietileno com diâmetros de 10; 13; 16,3; 17,4 e 19,7 mm.

A comparação gráfica das diversas equações, descritas anteriormente, para estimar o fator de atrito é apresentada na Figura 1. A faixa de Re está estendida (5000 a 20000) em relação àquela utilizada pelo microaspersor proposto neste trabalho (8000 a 17000). Evidentemente há uma incerteza na literatura em relação a este assunto.

Figura 1 - Relação entre Número de Reynolds (Re) e fator de atrito (f)

2.5 Dimensionamento de Linhas Laterais

As linhas laterais estão normalmente dispostas no campo em nível, uma vez que devem acompanhar a linha de plantio. Nestas linhas estão inseridos os emissores na irrigação localizada.

A vazão ao longo da linha lateral é variável, pois cada emissor provoca um decréscimo na vazão e conseqüentemente um decréscimo na perda de carga final. Assim sendo, para conhecer a

perda de carga que ocorre na linha lateral é necessário computar a variação de perda de carga entre cada duas saídas adjacentes, adicionando-a a perda localizada que ocorre no ponto de inserção do microaspersor, partindo do final para o início da linha (BOTREL, 1984). Para o cálculo da perda de carga na linha lateral, existem várias equações que podem ser utilizadas, no entanto, a equação de Darcy-Weisbach é amplamente aceita para este tipo de dimensionamento.

Da mesma forma, existem vários métodos para dimensionar linha lateral, no entanto, o chamado de trecho a trecho considera a perda de carga em cada trecho (entre emissores), bem como, o desnível no trecho, desta forma estima a pressão na entrada do emissor. Este método foi inicialmente descrito para irrigação por Pueyo e Forçada (1982) e posteriormente foi detalhadamente apresentado para irrigação localizada por Maia (1994) e Del Pino (2005). Antigamente este cálculo era bastante trabalhoso, mas atualmente o uso de planilhas no computador possibilita a execução de centenas de cálculos rapidamente, proporcionando uso mais freqüente deste método. Como resultado deste dimensionamento, tem-se o comprimento máximo da linha lateral limitado por um critério hidráulico. Um critério considerado válido em vários estudos, é o limite da variação de pressão e conseqüentemente da vazão dos emissores na irrigação localizada, definida pelo projetista (PROVENZANO; PUMO; DIO, 2005).

Na irrigação localizada com microtubos, a definição precisa da carga de pressão dos emissores é essencial, pois com base nestes valores é definido o comprimento do microtubo. O método trecho a trecho oferece esta precisão. A linha lateral é dimensionada do final para o início, assim, a perda de carga entre emissores pode ser calculada, desde que a vazão seja conhecida (HATHOOT; AL-AMOUD; MOHAMMAD, 1993). Recentemente, algumas metodologias simplificadas para análise hidráulica de linhas laterais, têm sido propostas para determinar perdas de carga localizada e total (VALLESQUINO; LUQUE-ESCAMILLA, 2001; PROVENZANO; PUMO; DIO, 2005). O uso de coeficientes relacionados ao número de saídas para irrigação por aspersão e localizada, também tem sido utilizado como, por exemplo, o fator F proposto por Christiansen (1942). Este é um método simples, baseado em vazão constante, que sugere a introdução do fator F na equação geral da perda de carga, evitando assim o cálculo trecho a trecho e mantendo relativa precisão. Conseqüentemente, o fator F é extremamente utilizado para computação direta da perda de carga por fricção, numa tubulação com múltiplas saídas igualmente espaçadas. Posteriormente, o fator G foi sugerido por Anwar (1999), o qual aperfeiçoa o fator F, uma vez que é mais generalizado, devido ser usado em linhas de irrigação

com múltiplos diâmetros, além de ser aplicável em sistemas com final de linhas aberto. Contudo estes métodos de dimensionamento de linhas laterais, não se aplicam ao sistema proposto neste estudo uma vez que, não oferecem os valores da pressão ponto a ponto como ocorre com o dimensionamento trecho a trecho.

2.6 Avaliação de sistemas de irrigação e do desempenho do emissor

Para que a irrigação seja eficiente, é imperativo que os sistemas apresentem alta uniformidade de aplicação da água. Uma vez instalado um projeto de irrigação, é necessário verificar se as condições previstas inicialmente se confirmam em campo. Para tanto, devem-se avaliar as condições de pressão, vazão e lâminas d'água aplicadas (SILVA; SILVA, 2005). A avaliação do desempenho consiste em um conjunto de ensaios dos elementos que integram o sistema de irrigação sob julgamento. Segundo Frizzone e Dourado Neto (2003), os ensaios dos sistemas de irrigação são realizados com os seguintes objetivos fundamentais: (a) determinar a eficiência atual do sistema de irrigação; (b) determinar quão efetivamente o sistema pode ser operado; (c) obter informações que permitam a comparação de vários métodos de irrigação, sistemas e formas de operação.

O termo uniformidade está relacionado aos parâmetros de desempenho, associados à variabilidade da lâmina de irrigação, aplicada na superfície do solo. A uniformidade de distribuição de água às plantas é fundamental para a obtenção da máxima produtividade da lavoura e/ou rentabilidade. Baixa uniformidade significa que há excesso de água em certos pontos do campo e falta em outros. Para atender as necessidades hídricas das plantas localizadas em posição crítica, aumenta-se o consumo de água utilizada na irrigação da área. Desta forma, pode-se afirmar que, quanto maior o valor do coeficiente de distribuição de água de um sistema, menor serão as lâminas aplicadas para se atingir uma máxima produção.

Para irrigação localizada, a aplicação uniforme de água ao longo das linhas de cultivo, depende dos seguintes pré-requisitos: a) os emissores, fabricados com mesmo design, devem alcançar vazão uniforme; b) o sistema de filtragem deve ser selecionado em função da qualidade de água utilizada; c) os sistemas de irrigação localizada devem ser dimensionados para compensar a variação de pressão ao longo da lateral (BUCKS; MYERS, 1973).

O desempenho dos sistemas de irrigação localizada pode ser avaliado através de medidas da pressão de serviço, vazão e uniformidade de aplicação de água. Para se determinar a uniformidade de distribuição de água no campo, pode-se medir a vazão dos emissores através do método volumétrico. Portanto, se fixa um tempo necessário para encher um recipiente de água com volume conhecido. No entanto, este procedimento pode incorrer em erros de leitura por parte do operador, por isso, normalmente prefere-se medir a vazão através de pesagem, desde que se corrija o peso específico da água em função da temperatura.

A uniformidade de distribuição de água em uma área pode ser expressa por um coeficiente de uniformidade. Quando este coeficiente é maior ou igual a certo valor arbitrário, a uniformidade de distribuição é considerada aceitável. Uma forma usual de obter os parâmetros de desempenho do sistema é por medidas de dispersão, expressando-os de forma adimensional, através comparação com o valor médio. Vários coeficientes de uniformidade têm caracterizado a distribuição da água em sistemas de irrigação pressurizados. A uniformidade estatística (U_s) foi primeiramente apresentada por Wilcox e Swailes (1947) quando avaliaram equipamentos de irrigação por aspersão (eq. 11), a qual resultou de uma modificação da equação proposta por Christiansen (1942) para o Coeficiente de Uniformidade. Bralts e Kesner (1983) propuseram este método de estimativa da uniformidade da vazão, para emissores na irrigação localizada, visando estimar eficiência de distribuição baseada no coeficiente de variação (CV), a partir de dados medidos a campo. As vantagens desse método incluem a simplicidade nos levantamentos de campo e a capacidade de estabelecer intervalos de confiança baseados na estimativa de uniformidade. Esse conceito é aplicado na irrigação localizada em vários trabalhos: Benami e Ofen (1984); Favetta, Botrel e Frizzone (1993); Silva e Silva (2005); Soares et al. (2006).

$$U_s = 100(1 - CV_q) = 100\left(1 - \frac{S_q}{\bar{q}}\right) \quad (11)$$

em que:

U_s = uniformidade estatística, %;

CV_q = coeficiente de variação da vazão do emissor;

S_q = desvio padrão da vazão do emissor, $L h^{-1}$;

$\bar{q}$ = média das vazões observadas, $L h^{-1}$.

Bralts (1986) ressalta que, na abordagem estatística todos os fatores que influenciam a uniformidade estão incluídos, tais como perda de carga e desnível topográfico. O critério geral para interpretação da uniformidade estatística (Us) é apresentado na Tabela a seguir:

Tabela 1 - Critérios para classificação da uniformidade estatística (Us)

Us (%)	Classificação
≥ 90	Excelente
80 – 90	Muito bom
70 - 80	Regular
60 - 70	Ruim
< 60	Inaceitável

Além do coeficiente de uniformidade estatística, outro coeficiente bastante utilizado para representação da uniformidade na irrigação localizada é a uniformidade de distribuição (UD) ou de emissão (UE), originalmente apresentado por Keller e Karmeli (1974). Segundo estes autores, esta uniformidade depende tanto da variação de vazão estimada devido à variação de pressão, bem como, da variação de vazão entre emissores que operam sob mesma pressão, devido às diferenças de fabricação. De acordo com Wu (1997), aspectos como temperatura da água, entupimento de emissores, variação das características hidráulicas do solo e o espaçamento entre emissores, também podem afetar significativamente esta medida de uniformidade. Sua definição está expressa na eq. (12), a qual é baseada na razão entre 25 % das menores vazões e a média dos emissores.

$$UE = 100 \cdot \frac{q_n}{\bar{q}} \quad (12)$$

em que:

UE = uniformidade de emissão, %;

q_n = média de 25% das menores vazões, L h⁻¹;

$\bar{q}$ = médias de todas as vazões, L h⁻¹.

Este conceito foi baseado na premissa de que o objetivo primário de um sistema de irrigação é assegurar a aplicação de uma quantidade mínima necessária de água na área irrigada.

No entanto, este método apresenta a desvantagem de não ter uma base estatística, por isso não é possível obter intervalos de confiança. Bralts (1986) apresenta os critérios para interpretação dos valores de UE apresentados na Tabela 2. A equação de uniformidade de emissão sugerida por Bralts (1986) utiliza o valor da vazão mínima como numerador da eq. (12). Entretanto, Favetta, Botrel e Frizzone (1993) investigando a correlação entre os coeficientes de uniformidade, utilizados na irrigação localizada, U_s , U_E e U_{Ea} (uniformidade de emissão absoluta), encontraram um coeficiente de correlação (r) de 0,999 entre os coeficientes. Este resultado permite utilizar o mesmo critério de classificação para as diferentes equações que estão relacionadas entre si. A uniformidade de emissão absoluta (U_{Ea}) tem o diferencial de inserir o coeficiente de variação de fabricação do emissor, vazões máximas e mínimas (KELLER; KARMELI, 1974) e o número de emissores por planta (BRALTS, 1986) porém, é mais utilizado em ensaios em laboratório. Apesar da alta correlação existente entre os coeficientes de uniformidades citados, o que viabiliza a comparação entre os resultados dos diferentes coeficientes, para efeito de avaliação de campo, prevalece a equação de UE inicialmente proposta (FAVETTA; BOTREL, 2001).

Tabela 2 - Critérios para classificação da uniformidade de emissão (UE)

UE (%)	Classificação
≥ 90	Excelente
80 - 90	Bom
70 - 80	Regular
< 70	Ruim

Segundo Silva, Brito e Azevedo (1988), considerando o processo artesanal e o baixo custo de confecção e instalação, linhas laterais com emissores do tipo microtubo de tamanhos variados, quando bem dimensionados, podem ser utilizados em sistemas localizados, obtendo-se razoáveis níveis de uniformidade de distribuição de água. Souza (2005) avaliando a uniformidade de distribuição, no cultivo de alface irrigado com microtubos por gravidade, encontrou desempenho hidráulico excelente (U_E e U_s acima de 95 %).

Quando se tem baixa uniformidade, normalmente as causas deste problema estão relacionadas ao dimensionamento do sistema de irrigação. Conseqüentemente, estas podem ser decorrentes de fatores como: diâmetro impróprio das tubulações, pressão de serviço muito alta

ou muito baixa, perda de carga ao longo da linha lateral diferente da estimada e mudanças na pressão de saída da bomba.

2.7 Informática na agricultura

O Brasil possui grande potencial para o desenvolvimento da informática aplicada à agricultura. Com a introdução deste recurso, pretende-se viabilizar soluções em tecnologia da informação para o agronegócio. O cálculo computacional abriu um novo e vasto panorama com muitas vias de solução para os problemas da água, sua distribuição e seu benefício através da irrigação (BALTRA, 1987). Projetistas e engenheiros também utilizam esta valiosa ferramenta para agilizar seus cálculos e para elaborar a apresentação e a manipulação de seus projetos, facilitando o trabalho no que se refere a tempo para alterações, ou erros na confecção de tais projetos, visto que o projeto final pode ser alterado facilmente quando realizado em microcomputadores.

Planilhas eletrônicas desenvolvidas no aplicativo Excel, com uso na agronomia, são muito populares atualmente, devido suas ferramentas de cálculo. Em geral as planilhas são programadas para dimensionamentos que demandariam muito tempo para serem concluídos, especialmente em projetos de irrigação. Os usuários podem utilizar computadores com o sistema operacional Microsoft Windows e computadores Macintosh da Apple. O Excel tem incluído o Visual Basic for Applications (VBA), uma linguagem de programação baseada no Visual Basic que adiciona a capacidade de automatizar suas tarefas para uso em pastas de trabalho, permitindo replicar ações do usuário.

Referências

ANWAR, A.A. Factor G for pipelines with equally spaced multiple outlets and outflow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 125, n. 1, p. 34-38, Jan. 1999.

AZEVEDO NETO, J.M.; FERNANDEZ, M.F.; ARAUJO, R.; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 4. ed. São Paulo: USP, 2005. 669 p.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow-resistance law for small-diameter plastic pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 121, n. 5, p. 313-316, Sept./Oct. 1995.

BALTRA, A.O.C. Utilização da informática na irrigação. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 28, p. 13-15, mar. 1987.

BENAMI, A.; OFEN, A. **Irrigation engineering**. Haifa: IESP, 1984. 257 p.

BERNUTH, R.D. von; WILSON, T. Friction factors for small diameter plastic pipes. **Journal Hydraulic Engineer**, New York, v. 115, n. 2, p. 183–192, Feb. 1989.

BHATNAGAR, P.R.; SRIVASTAVA, R.C. Gravity-fed drip irrigation system for hilly terraces of the northwest Himalayas. **Irrigation Science**, Berlin, v. 21, n. 4, p. 151-157, Jan. 2003.

BOTREL, T. **Hidráulica de microaspersores e de linhas laterais para irrigação localizada**. 1984. 78 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

BRALTS, V.F. Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. (Ed.). **Trickle of irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986. chap. 3, p. 216-240.

BRALTS, V.F.; KESNER, C.D. Drip irrigation field uniformity estimation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, n 5, p. 1369-1374, Sept./Oct. 1983.

BUCKS, D.A.; MYERS, L.E. Trickle of irrigation – application uniformity from simple emitter. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 16, n. 6, p. 1108-1111, Nov./Dec. 1973.

CAMARGO, L.A. **Equações explícitas para o fator de atrito de Darcy-Weisbach**. 2001. Disponível em: <<http://paginas.terra.com.br/servicos/hidrotec/EquExpli.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2008.

CARDOSO, G.G.G.; FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum – Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 3, p. 299-305, jun. 2008.

CHADWICK, A.; MORFETT, J.; BORTHWICK, M. **Hydraulics in civil and environmental engineering**. 4th ed. London: Spon, 2006. 644 p.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).

DEL PINO, M.A.I.T. **Sistema computacional de auxílio ao desenho, simulação e desenvolvimento de projetos de irrigação localizada**. 2005. 142 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

FAVETTA, G.M.; BOTREL, T.A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação das equações. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 427-430, abr./jun. 2001.

FAVETTA, G.M.; BOTREL, T.A.; FRIZZONE, J.A. Correlação entre três métodos de estimativa da uniformidade de distribuição em irrigação localizada. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 4, n. único, p. 117-125, jul./dez. 1993.

FRIZZONE, J.A.; DOURADO NETO, D. Avaliação de sistemas de irrigação. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. (Ed.). **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, cap. 15, p. 573-651.

FRIZZONE, J.A.; VIEIRA, A.T.; PAZ, V.P.S.; BOTREL, T.A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, set./dez. 1998.

HATHOOT, H.M.; AL-AMOUD, 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, Sept./Oct. 1993.

HEINZE, B.C.L.B. **A importância da agricultura irrigada para o desenvolvimento da região nordeste do Brasil**. São Paulo: FGV, Ecobusiness School, 2002. 59 p.

HERNANDEZ, F.B.T. **Manejo da irrigação**. 2004. Disponível em: <<http://www.irrigaterra.com.br/manejo.php>>. Acesso em: 28 ago. 2005.

ISHAQ, A.M.; IBRAHIM, M.A. The design of trickle irrigation systems with microtubes as emitters. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MICROIRRIGATION, 5., 1995, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ASAE, 1995. p. 708-716.

KARMELI, D. Classification and flow regime analysis of drippers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 22, n. 2, p. 165-173, June 1977.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 678-684, July/Aug. 1974.

KENWORTHY, A.L. **Trickle irrigation: the concept and guideline for use**. Michigan: Michigan State University, 1972. 20 p. (Research Report, 165).

KHATRI, K.C.; WU, I.; GITLIN, H.M.; PHILLIPS, A. Hydraulics of microtube emitters. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 105, n. IR2, p. 167-173, June 1979.

MAIA, L.A.F. **Desenvolvimento de um software para auxiliar no dimensionamento e manejo da irrigação localizada**. 1994. 158 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

MATOS, J.A.; NETO, J.D.; AZEVEDO, C.A.V.; AZEVEDO, H.M. Avaliação da distribuição de água de um microaspersor autocompensante. **Irriga**, Botucatu, v. 4, n. 3, p. 168-174, 1999.

OLITTA, A.F.L. Projeto de irrigação localizada. In: CURSO DE ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE IRRIGAÇÃO, 1986, Brasília. Brasília: Programa Nacional de Irrigação, 1986. p. T11.1-T11.57.

PAES, L.A.D. **Características hidráulicas dos microaspersores Dantas MA120 e Irtec e das linhas laterais em sistemas de irrigação por microaspersão.** 1985. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1985.

PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF):** goteo, microaspersión, exudación. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.

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

PUEYO, L; FORÇADA, J. Cálculo hidráulico: instruções para rede de microaspersão. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 11, p. 28-36, dez. 1982.

SILVA, C.A.; SILVA, C.J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, ano 4, n. 8, 2005. Disponível em: <<http://www.revista.inf.br/agro/artigos/artigo08.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2006.

SILVA, P.J.C.; BRITO, R.A.L.; AZEVEDO, H.M. Caracterização hidráulica de linhas laterais em sistemas localizados, utilizando microtubos de tamanho variado como emissores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABID, 1988. v. 1, p. 473-505.

SOARES, A.A.; BERNARDO, S.; LOUREIRO, B.T.; CONDÉ, A.R. Características hidráulicas de microtubos “cípla” e de linhas laterais para irrigação por gotejamento. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 10, n. 1, p. 5-9, set. 1982.

SOARES, E.L.; CRUZ, T.M.L.; FREITAS, C.A.S.; TEIXEIRA, A.S. Avaliação de um sistema de irrigação por microaspersão na cultura de mamoeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABID, 2006. 1 CD-ROM.

SOUZA, R.O.R.M. **Modelagem, desenvolvimento de software para dimensionamento, e avaliação de sistemas de irrigação localizada por gotejamento com microtubos.** 2005. 100 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOUZA, R.O.R.M.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Agriambi**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 16-22, jan./abr. 2004.

SOUZA, R.O.R.M.; PÉREZ, G.F.E.; BOTREL, T.A. Irrigação localizada por gravidade com microtubos. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 2, p. 266-279, abr./jun. 2006.

VALLESQUINO, P.; LUQUE-ESCAMILLA, L. New algorithm for hydraulic calculation in irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 127, n. 4, p. 254-260, July/Aug. 2001.

WATTERS, G.Z.; KELLER, J. **Trickle irrigation tubing hydraulics**. St. Joseph: ASAE, 1978. 18 p. (ASAE Technical Paper, 78-2015).

WILCOX, J.C.; SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, Ottawa, v. 27, n. 11, p. 565-583, Jan./Dec. 1947.

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

WU, I.P.; GITLIN, H.M. Hydraulics and uniformity for drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 99, n. IR3, p. 157-168, June 1973.

3 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DE MICROTUBOS POR METODOLOGIA HIDRODINÂMICA

Resumo

Os microtubos têm sido utilizados como gotejador de longo percurso desde a década de 70. Nestes tubos, pequenas diferenças no valor do diâmetro podem provocar uma estimativa errônea da vazão, comprometendo o projeto de irrigação, mesmo quando os valores reais determinados são próximos aos do catálogo do fabricante. A determinação precisa do diâmetro está intimamente relacionada à vazão do emissor. Este trabalho teve como objetivo determinar o diâmetro interno de microtubos hidrodinamicamente e com o projetor ótico de perfis, visando comparar estes valores com àqueles fornecidos pelo fabricante. Os microtubos utilizados possuem diâmetro nominal de 0,6; 0,7; 0,8; 1,0 e 1,5 mm, de acordo com o fabricante. Para determinação óptica do diâmetro foi utilizado o projetor ótico de perfil de fabricação da Starrett Precision Optical, realizada em 30 anéis com 5 mm de comprimento de cada microtubo. Na determinação hidrodinâmica, o diâmetro foi calculado através de dados obtidos em ensaio sob regime laminar, aplicados nas equações Darcy-Weisbach e Bernoulli. Os resultados desta pesquisa mostraram que, o correto dimensionamento de um projeto de irrigação, por microtubos, deve ser baseado preferencialmente em seu diâmetro determinado hidrodinamicamente, visto que, não apresentou diferenças quando comparado com o padrão (projetor ótico de perfil).

Palavras-chave: Irrigação localizada; Projetor ótico de perfil; Bernoulli; Darcy-Weisbach

Abstract

INTERNAL DIAMETER DETERMINATION OF THE MICROTUBE BY HYDRODYNAMIC PROCEDURE

Microtube is a simple kind of drip emitter which has been used since 70's. In microtubes, small differences in diameter can cause errors in estimating discharge, reducing the irrigation project efficiency, even if the real values are close to those specified by the manufacturer. In this work, microtube inside diameters were determined by using an optic measuring projector and hydrodynamic determination, and compared them to data supplied by manufacturer, commonly used to design irrigation systems. The microtubes used had diameters of 0.6; 0.7; 0.8; 1.0 and 1.5 mm, according to the manufacturer. The optical projector manufactured by Starrett Precision Optical was used in thirty rings with 5 mm of length for each microtube. Hydrodynamic determination of diameter was calculated with data obtained in tests under laminar flow, applied to basic equation for energy drop by friction and Bernoulli's equation. Based on these results, it's

suggested that optimum irrigation project design should use microtube diameters determined by hydrodynamic determination, as well as by optic measuring projectors, and not only the diameter supplied by manufacturer. The most simple and viable way is hydrodynamic determination of the inside diameter, due to didn't present differences when compared to standard optical projector.

Keywords: Trickle irrigation; Optical projector; Bernoulli; Darcy-Weisbach

3.1 Introdução

Pequenas variações no valor do diâmetro da secção transversal de fluxo nos microtubos influenciam consideravelmente, na perda de carga por atrito, consequentemente, implicam em erro na estimativa da vazão, comprometendo o dimensionamento e manejo do projeto de irrigação. Caso não haja uma criteriosa determinação do diâmetro real do microtubo, pode-se inferir que haverá déficit ou excesso na aplicação de água às culturas, podendo comprometer a viabilidade econômica do projeto. Logo, é de suma importância determinar com precisão este parâmetro em laboratório seja através do projetor ótico de perfil, com precisão de três casas decimais ou utilizando o método hidráulico por pesagem.

Keller e Karmeli (1974) relatam que o comprimento da passagem de um gotejador de longo percurso, necessário para a obtenção de uma vazão pré-estabelecida, pode ser obtido pela equação de Darcy-Weisbach. Khatri et al. (1979) afirmam que a hidráulica básica do microtubo é similar a hidráulica de tubos lisos, portanto, a perda de carga contínua dentro do microtubo e a perda de carga localizada têm equações idênticas àquelas desenvolvidas pra tubos lisos, ratificando a observação feita por Keller e Karmeli (1974). Nessa equação, qualquer variação no diâmetro da seção transversal do fluxo influirá consideravelmente na perda de carga por fricção. A determinação precisa do diâmetro está intimamente relacionada à vazão do emissor. Souza e Botrel (2004) comentam que mesmo quando os valores reais determinados são próximos aos do catálogo do fabricante, em se tratando de microtubos, a menor diferença no valor do diâmetro pode provocar uma estimativa errônea da vazão, comprometendo a eficiência do projeto de irrigação.

Existem diversos meios de se determinar o diâmetro de bocais de emissores de irrigação. A medição do diâmetro por meios óticos é uma abordagem diferente e valiosa no controle da qualidade. Este método, sem contato, fornece uma visualização gráfica de muitos tipos de peças,

as quais podem ser medidas. Dimensões e formas que seriam difíceis de medir com instrumentos tradicionais, são facilmente verificadas por meio da ótica. Esses sistemas são constituídos por elementos óticos de precisão, iluminação intensa e capacidade de medição extremamente exata, numa mesa de trabalho. A ótica de alta resolução e a intensa iluminação assegura imagens nítidas e excepcionalmente fiéis. Em laboratório esses procedimentos são realizados via projetor ótico de perfil, com precisão de 0,001 mm. Para bocais de emissores utilizados na irrigação, bem como, para microtubos, recomenda-se um projetor horizontal o qual, se destina a peças que precisam ser presas em morsas ou entre - pontas, como é o caso do microtubo (SOUZA; BOTREL, 2004; STARRET, 2007; TEIXEIRA; MELO; COELHO, 2007). Por outro lado, este equipamento tem uso limitado, em função do seu alto custo de aquisição.

Várias pesquisas são realizadas com o diâmetro real dos tubos determinados por peso (BAGARELLO et al., 1995; PROVENZANO; PUMO, 2004; DEMIR; YURDEM; DEGIRMENCIOGLU, 2007). No entanto, para microtubos, esta metodologia é inadequada em função da dificuldade de preencher e pesar um tubo com diâmetro tão reduzido ($< 1,5$ mm). Portanto, neste capítulo da pesquisa utilizou-se a medida de fluxo para se determinar o diâmetro em laboratório por um método denominado hidrodinâmico que, por ser bastante simples, não exige conhecimentos técnicos específicos para realizá-lo. Este método foi utilizado por Bernuth e Wilson (1989) para tubos de PVC (16 e 26 mm) e polietileno (14 mm).

Diante do exposto, em relação à importância da determinação precisa do diâmetro de microtubo, para o dimensionamento de sistemas de irrigação, neste capítulo teve-se como objetivo verificar a hipótese de que se pode determinar o diâmetro de microtubos por medida de fluxo sob regime laminar de escoamento. Para isso, comparam-se as medidas do diâmetro realizadas com o projetor ótico de perfis, bem como, aquelas obtidas na determinação hidrodinâmica em relação aos dados fornecidos pelo fabricante, comumente utilizados para dimensionar os projetos de irrigação.

3.2 Material e Métodos

O experimento foi realizado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, utilizando microtubos de polietileno fabricados pela Plasnova Louveira Ind. Com. Ltda com diâmetro nominal de 0,6; 0,7; 0,8; 1,0 e 1,5 mm.

Para determinação hidrodinâmica do diâmetro dos microtubos, sob regime laminar, realizou-se o ensaio esquematizado pela Figura 2.

Figura 2 - Esquema de coleta de vazão para medição do diâmetro

Para a realização deste ensaio, o reservatório superior deverá ser maior que o inferior numa amplitude suficiente para que se possa negligenciar a variação da carga hidráulica proveniente do volume coletado. Neste estudo, por exemplo, com a área do reservatório superior de 707 cm^2 e um volume coletado de 0,5 L, a redução na carga hidráulica foi de 0,7 cm. Esta redução corresponde à 0,35 % da carga hidráulica total de 2 m, utilizada no ensaio, conseqüentemente, pôde-se desconsiderar esta variação. A água utilizada foi destilada, fervida e resfriada a vácuo. O ensaio constituiu em permitir que a água fluísse por gravidade para o reservatório inferior de peso conhecido, destinado a coleta, durante um determinado intervalo de tempo, e pesado posteriormente. O volume da água foi computado utilizando peso e densidade, conseqüentemente tem-se a taxa de fluxo calculada. Em cada repetição foi realizada a medição da temperatura da água para cálculo de sua viscosidade cinemática. A necessidade desta ação deve-se ao fato de que

o fluxo sob regime laminar é bastante sensível à variação de temperatura (SOARES, 1981; PIZARRO CABELLO, 1996; SOUZA, 2005).

Alguns ensaios preliminares foram realizados para definir a metodologia de determinação hidrodinâmica do diâmetro dos microtubos. Nesta etapa os microtubos tinham comprimentos de 0,5 a 3 m (com incrementos de 0,5 m), sendo que para cada comprimento avaliou-se o diâmetro variando a distância entre o nível da água do reservatório superior e a extremidade inferior do microtubo (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 m), com três repetições para cada altura e comprimento. Como não houve mudanças significativas no valor do diâmetro calculado em função das diversas alturas e comprimentos, estabeleceu-se, portanto, que a determinação hidrodinâmica do diâmetro seria realizada em microtubos com 3 m de comprimento e uma carga hidráulica de aproximadamente 2 m, e que a vazão de cada microtubo seria resultante da média de cinco repetições.

Para o cálculo do diâmetro utilizaram-se as equações de Bernoulli (13) e de Darcy-Weisbach (14) descritas a seguir:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + hf \quad (13)$$

em que:

$\frac{P}{\gamma}$ = carga de pressão, m;

$\frac{V^2}{2g}$ = carga cinética, m;

Z = carga potencial, m;

hf = perda de carga no microtubo, m.

Várias equações permitem calcular a perda de carga em tubulações de polietileno de pequenos diâmetros e, entre elas, consagrou-se a equação de Darcy-Weisbach, que é a equação universal para determinação de perda de carga, a qual pode ser utilizada em regimes laminar e turbulento, com resultados satisfatórios (FRIZZONE et al., 1998).

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (14)$$

em que:

hf = perda de carga, m;

f = fator de atrito na parede do tubo, adimensional;

L = comprimento do microtubo, m;

D = diâmetro do microtubo, m;

V = velocidade da água no microtubo, $m\ s^{-1}$;

g = aceleração da gravidade, $m\ s^{-2}$.

O fator de atrito (f) desta equação depende do número de Reynolds e da rugosidade relativa do tubo. Como neste ensaio assumiu-se que, os tubos de polietileno são hidraulicamente lisos e o regime de escoamento laminar, a rugosidade relativa do tubo foi desconsiderada.

Substituindo a equação da continuidade e assumindo-se que o nível de referência passa no ponto Z_2 e a variação da carga hidráulica pode ser desconsiderada, realizaram-se as devidas simplificações na eq. (13), obtendo-se assim, a eq. (15).

$$hf = z_1 - \frac{0,08262647Q^2}{D^4} \quad (15)$$

Souza e Botrel (2004) realizaram a avaliação dos microtubos em diferentes condições de diâmetro, pressão e comprimento e concluíram que eles funcionaram em regime laminar. Esta condição deve ser considerada na determinação hidrodinâmica do diâmetro, evitando as incertezas e as dificuldades de representação do fenômeno de perda de energia no microtubo em regime de transição. Portanto o fator de atrito (f) da equação Darcy-Weisbach para regime de escoamento laminar é expresso através de uma relação linear com Número de Reynolds que é a equação de Hagen-Poiseuille (eq. 16).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

em que:

Re = número de Reynolds, adimensional (eq. 2).

Realizada a substituição da eq. (16) na eq. (14) e as necessárias simplificações obtém-se a eq. (17):

$$hf = \frac{4,153269\nu LQ}{D^4} \quad (17)$$

Sendo assim, agora se podem igualar as eq. (15) e (17), e isolar o diâmetro como apresentado na eq. (18). A demonstração detalhada desta equação pode ser vista no anexo A.

$$D = \left(\frac{0,08262647Q^2 + 4,153269\nu LQ}{Z_1} \right)^{0,25} \quad (18)$$

em que:

hf = perda de carga no microtubo, m;

ν = viscosidade cinemática da água, $m^2 s^{-1}$;

L = comprimento do microtubo, m;

Q = vazão, $m^3 s^{-1}$;

D = diâmetro, m.

Através do ensaio apresentado na Figura 2, obtêm-se os valores de vazão (Q) e diferença de nível (Z), logo, através da eq. (18) calcula-se o diâmetro interno do microtubo pelo método hidrodinâmico.

Para determinação ótica do diâmetro foi utilizado o projetor ótico de perfil de fabricação da Starrett Precision Optical, do tipo Horizontal de Bancada N° HB400, específico para este tipo de aplicação. Este equipamento permite aferir em escalas digitais com resolução de 0,001 mm o diâmetro do microtubo, na condição de pressão hidrostática nula. A determinação do diâmetro no projetor ótico de perfil foi realizada com 30 anéis de cada microtubo com 5 mm de comprimento, aproximadamente. O valor médio destas leituras foi considerado padrão para efeito de comparação entre o diâmetro determinado hidrodinamicamente e aquele fornecido pelo fabricante, chamado neste trabalho de nominal.

As linhas laterais utilizadas neste ensaio eram de polietileno, cujo diâmetro interno médio foi determinado indiretamente através do volume contido num segmento do tubo. Como estes tubos são vendidos em bobinas e, devido ao seu acondicionamento, há uma deformação que necessitou ser investigada, pois alguma perda de carga adicional pode ter ocorrido devido ao

efeito da curvatura. Para isso, um segmento deste tubo com 20 cm de comprimento, tendo uma das extremidades vedadas foi introduzido num tubo de PVC de 16 mm ($\frac{3}{4}$ ”), funcionando como guia para corrigir a deformação e pesado em balança digital com precisão de 0,01 g. Com o auxílio de uma pipeta com capacidade de 50 mL, preencheu-se o segmento do tubo de polietileno com água destilada. O conjunto (tubo + PVC + água) foi novamente pesado. Este ensaio foi repetido três vezes. Em seguida repetiu-se este procedimento sem o tubo de PVC, para observar se realmente o valor do diâmetro sofreu interferência da curvatura. O diâmetro interno foi obtido através da eq. (19), assumindo-se a geometria interna do tubo como cilíndrica e a temperatura da água foi verificada para correção do seu peso específico.

$$D = \sqrt{\frac{4Vol}{\pi h}} \quad (19)$$

em que:

D = diâmetro do tubo, m

Vol = volume de água destilada contida no tubo, m³

h = comprimento do segmento do tubo, m

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Ensaio para determinação do diâmetro interno dos microtubos

Os resultados obtidos no ensaio hidrodinâmico foram 0,617; 0,698; 0,890; 1,072 e 1,500 mm, respectivamente para os diâmetros nominais de 0,6; 0,7; 0,8; 1,0 e 1,5 mm.

As medidas dos diâmetros dos microtubos, obtidas através do projetor ótico de perfil, são apresentadas na Tabela 3. A precisão do equipamento e homogeneidade dos microtubos reflete o baixo coeficiente de variação de fabricação dos microtubos.

Souza e Botrel (2004) avaliaram os diâmetros de quatro microtubos do mesmo fabricante, no projetor de perfil e encontram valores ligeiramente diferentes dos apresentados neste trabalho (0,679; 0,695; 0,820 e 1,024 mm). Este fato indica que periodicamente devem ser mensurados os diâmetros para obter maior precisão no dimensionamento de projetos de irrigação por com microtubos. Além disso, estes autores recomendam que mesmo os valores determinados tanto

hidrodinamicamente como pelo projetor ótico de perfil estejam próximos ao indicado pelo fabricante, no caso de microtubos uma pequena diferença de 0,05 mm, por exemplo, deve ser considerada significativa.

Tabela 3 - Valores do diâmetro interno dos microtubos medidos com o projetor ótico de perfil

Amostras de microtubos	Diâmetro Nominal, mm				
	0,6	0,7	0,8	1,0	1,5
	Diâmetro medido (mm)				
1	0,570	0,631	0,828	1,088	1,512
2	0,606	0,636	0,826	1,085	1,512
3	0,573	0,618	0,844	1,041	1,518
4	0,580	0,635	0,829	1,066	1,501
5	0,578	0,648	0,827	1,056	1,491
6	0,568	0,645	0,819	1,068	1,517
7	0,562	0,636	0,839	1,064	1,483
8	0,589	0,641	0,853	1,081	1,508
9	0,588	0,625	0,851	1,071	1,521
10	0,587	0,640	0,818	1,035	1,454
11	0,572	0,616	0,810	1,077	1,534
12	0,571	0,636	0,827	1,076	1,427
13	0,567	0,662	0,839	1,072	1,502
14	0,580	0,651	0,817	1,069	1,520
15	0,567	0,628	0,838	1,075	1,511
16	0,573	0,656	0,834	1,076	1,453
17	0,577	0,644	0,835	1,057	1,516
18	0,578	0,662	0,859	1,065	1,540
19	0,596	0,658	0,827	1,075	1,528
20	0,582	0,619	0,833	1,069	1,523
21	0,567	0,618	0,828	1,067	1,518
22	0,576	0,633	0,858	1,083	1,537
23	0,572	0,617	0,862	1,076	1,516
24	0,584	0,656	0,845	1,072	1,523
25	0,598	0,652	0,812	1,075	1,495
26	0,576	0,655	0,821	1,074	1,530
27	0,584	0,638	0,829	1,058	1,505
28	0,566	0,622	0,822	1,068	1,524
29	0,570	0,612	0,817	1,073	1,524
30	0,570	0,631	0,828	1,076	1,535
Média	0,579	0,638	0,834	1,072	1,517
CVf (%)	1,9	2,3	1,8	1,1	1,7

A Tabela 4 resume em percentual as diferenças entre os valores médios dos diâmetros dos microtubos obtidas das três fontes. Ao compararmos os valores médios obtidos

hidrodinamicamente com o diâmetro nominal, observamos que a maior diferença nos valor do diâmetro foi de 11,25 %, equivalente a uma diferença na ordem de 9 centésimos de milímetro. Esta análise ratifica a importância da determinação do diâmetro interno de microtubos com precisão para uso em irrigação. Através do projetor ótico de perfil, as medidas dos diâmetros dos microtubos com 0,6 e 0,7 mm foram menores que os nominais em 3,6 e 8,9 %, respectivamente. No entanto, para os microtubos de diâmetro nominal de 0,8; 1,0 e 1,5 mm os diâmetros medidos foram maiores em 4,2; 7,2 e 1,1 % respectivamente (Tabela 4). Essa variação indica que pode haver discrepâncias no diâmetro informado pelo fabricante, em relação ao diâmetro real do microtubo.

Tabela 4 - Diferenças observadas nas medidas dos diâmetros obtidos hidrodinamicamente e pelo projetor ótico de perfil em relação ao diâmetro nominal

DN (mm)	Diferença, %		
	DN x DH	DN x DP	DP x DH
0,6	2,83	-3,6	-6,2
0,7	-0,29	-8,9	-8,6
0,8	11,25	4,2	-6,3
1,0	7,20	7,2	0,0
1,5	0,00	1,1	-1,1

DN: diâmetro nominal; DH: diâmetro determinado hidrodinamicamente e DP: diâmetro obtido no projetor ótico de perfis.

Sabe-se que vazão de um emissor é função da área, que por sua vez é função do quadrado do diâmetro, conseqüentemente sutis variações no diâmetro refletem numa maior variação de vazão. Diante dos dados apresentados, podemos inferir que o diâmetro interno dos microtubos determinado hidrodinamicamente, deve ser tomado por referência no dimensionamento de projetos de irrigação com microtubos. Esta decisão baseia-se na simplicidade e baixo custo do ensaio. Além disso, o comprimento do microtubo utilizado na determinação hidrodinâmica do diâmetro é mais representativo (3 m), pois no projetor ótico de perfil o comprimento da amostra do microtubo foi muito pequeno (5 mm).

Vale ressaltar ainda que, os projetos de irrigação têm por base critérios hidráulicos e, portanto é mais coerente utilizar este valor de diâmetro. Em relação ao diâmetro indicado pelo fabricante, apesar de ser atualmente bastante utilizado, o projetista pode está incidindo em erros, uma vez que, evidentemente há variação de fabricação em função do desgaste das máquinas e

contração do material. Já o projetor ótico de perfil, possui um elevado custo de aquisição, limitando seu uso de maneira geral.

3.3.2 Ensaio para determinação do diâmetro do tubo usado na linha lateral

A Tabela 5 apresenta os dados coletados no ensaio e os cálculos do diâmetro real do tubo de polietileno utilizado em linhas laterais na irrigação localizada. A temperatura da água destilada no momento do ensaio foi de 27° C, portanto o peso específico da água é de 996,58 Kgf. m⁻³.

O diâmetro médio encontrado de três repetições foi de 13,42 mm, com o uso do tubo de PVC, diferenciando do diâmetro interno nominal (13 mm) em 11,8 % a mais. Este resultado ratifica a importância da determinação do diâmetro real no dimensionamento de um sistema de irrigação, pois o comprimento da linha lateral está diretamente relacionado ao seu diâmetro. Quanto ao uso do tubo de PVC para corrigir a curvatura no segmento do tubo, percebe-se que pode ser dispensável, uma vez que arredondando para uma casa decimal, não houve diferença nos valores do diâmetro.

Tabela 5 - Diâmetro interno do tubo de polietileno usado na linha lateral da irrigação localizada

Peso da água (kg)	Volume corrigido (L)	Diâmetro do tubo (mm)
Com o tubo de PVC		
0,02824	0,02834	13,43
0,02821	0,02831	13,42
0,02815	0,02825	13,41
Sem o tubo de PVC		
0,02794	0,02803	13,36
0,02802	0,02811	13,38
0,02799	0,02808	13,37

3.4 Conclusões

Para um projeto de irrigação ser corretamente dimensionado deve-se determinar o diâmetro real do microtubo, seja hidrodinamicamente, ou através do projetor ótico de perfil, caso disponha facilmente do mesmo, principalmente para tubo com pequenos diâmetros ($< 1,5$ mm).

A avaliação hidrodinâmica do diâmetro dos microtubos aproximou-se muito da determinação através do projetor ótico de perfil, o que indica ser uma alternativa viável para o dimensionamento sem a necessidade de um investimento alto num equipamento sofisticado.

O valor do diâmetro interno real dos tubos usados na linha lateral de irrigação deve ser determinado hidraulicamente para elevar a precisão do seu dimensionamento.

Não houve diferenças notáveis no diâmetro do tubo utilizado na linha lateral entre os segmentos curvo e reto, assim não é necessário fazer correções neste valor.

Referências

- BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow-resistance law for small-diameter plastic pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 121, n. 5, p. 313-316, Sept./Oct. 1995.
- BERNUTH, R. D.; WILSON, T. Friction factors for small diameter plastic pipes. **Journal Hydraulic Engineer**, New York, v. 115, n. 2, p.183–192, Feb. 1989.
- DEMIR, V.; YURDEM, H.; DEGIRMENCIOGLU, A. Development of Prediction Models for Friction Losses in Drip Irrigation Laterals equipped with Integrated In-line and On-line Emitters using Dimensional Analysis. **Biosystems Engineering**, London, v. 96, n. 4, p. 617–631, 2007.
- FRIZZONE, J.A.; VIEIRA, A.T.; PAZ, V.P.S.; BOTREL, T.A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, set./dez. 1998.
- KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 678-684, July/Aug. 1974.
- KHATRI, K.C.; WU, I.; GITLIN, H.M.; PHILLIPS, A. Hydraulics of microtube emitters. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 105, n. IR2, p. 167-173, June 1979.

PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF):** goteo, microaspersión, exudación. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513p.

PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental analysis of local pressure losses. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 130, n. 4, p. 318-324, July/Aug. 2004.

SOARES, A.A. **Características hidráulicas de microtubos Cipla e linhas laterais para irrigação por gotejamento.** 1981. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1981.

SOUZA, R.O.R.M. **Modelagem, desenvolvimento de software para dimensionamento, e avaliação de sistemas de irrigação localizada por gotejamento com microtubos.** 2005. 100 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOUZA, R.O.R.M.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Agriambi**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 16-22, 2004.

STARRETT. **Projeto de perfil.** Disponível em:

<<http://www.starrettonline.com/produto.asp?catPai=53&catID=53&prdID=621>>. Acesso em: 20 jun. 2007.

TEIXEIRA, M.B.; MELO, R.F.; COELHO, R.D. Coeficiente de descarga de emissores de pivô central. **Irriga**. Botucatu, v. 12, n. 1, p. 123-134, jan./mar. 2007.

4 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DOS MICROTUBOS UTILIZADOS NA IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO

Resumo

O microtubo é um emissor simples e de baixo custo que foi mundialmente utilizado no início da irrigação por gotejamento. O comprimento do microtubo é determinado em função da distribuição de pressão ao longo da linha lateral e da vazão desejada do emissor. Outra vantagem deste tipo de emissor, é que pode ser utilizado em condições onduladas e montanhosas, onde a pressão na linha lateral varia consideravelmente devido às diferenças na topografia. Esta é, portanto, a maior dificuldade na elaboração de um projeto de irrigação localizada, ou seja, as mudanças de vazão devido às variações de pressão ao longo da linha lateral de irrigação. Neste estudo, um novo modelo de microaspersor é proposto, no qual se usa um microtubo como emissor e seu comprimento varia em função da pressão na inserção do microaspersor, resultando em vazão constante ao longo da linha. Os objetivos desta etapa do trabalho foram desenvolver o modelo empírico para dimensionar o sistema e verificar a validade teórica e empírica destes modelos. Os ensaios de laboratório foram realizados com dois microtubos de diferentes diâmetros (1,07 e 1,5 mm), relacionando pressão-vazão-comprimento para estes emissores. As equações propostas foram utilizadas no dimensionamento do microaspersor para determinar o comprimento do microtubo para uma dada vazão nominal e para uma dada pressão. O modelo teórico destaca a importância da precisão na determinação do diâmetro do microtubo e as incertezas na estimativa do fator de fricção para estes microtubos. O modelo empírico estimou a pressão em função do comprimento do microtubo com bastante precisão ($r^2 > 0,9$). A metodologia proposta oferece a possibilidade de ajustar quaisquer variações na pressão na linha de irrigação ou na topografia, para obter vazão constante ao longo da linha lateral.

Palavras-chave: Irrigação localizada; Darcy-Weisbach; Barr

Abstract

HYDRAULIC CHARACTERIZATION OF THE MICROTUBE EMITTERS USED IN A MICRO-SPRINKLER

The microtube is a simple and cheap emitter that was widely used throughout the world in the early days of drip irrigation. Its length can be adjusted according to the pressure distribution along the lateral line and the desired discharge. Another advantage is that they are suitable for undulating and hilly conditions, where pressure in the lateral line varies considerably according to the differences in elevation. This is the major problem facing the designer, i.e. emitter flow

changes as the acting pressure head changes. In this study, a novel micro-sprinkler system is proposed that uses microtube as the emitter and where the length of the microtube can be varied in response to pressure changes along the lateral to give uniformity of emitter discharges. The objectives of this work are to develop the empirical approach to the design of the system and verifying the validity theoretical and empirical of these models. Laboratory testing of two microtube emitters of different diameter (1.07 and 1.50 mm) over a range of pressures and discharges has led to the development of empirical equations relating pressure and discharge, and pressure and length for these emitters. The equations proposed will be used in the design of the micro-sprinkler system, to determine the length of microtube required to give the nominal discharge for any given pressure. The semi-theoretical approach underlined the importance of accurate measurements of the microtube diameter and the uncertainty in the estimation of the friction factor for these tubes. The empiric approach estimated pressure as a function of the microtube length with high accuracy ($r^2 > 0.9$), then it is able to delivery water according to each plant needs. This proposal allows fitting any pressure head or elevation variations to have equal discharge a long of lateral line.

Keywords: Trickle irrigation; Darcy-Weisbach's equation; Barr's equation

4.1 Introdução

Em qualquer sistema de irrigação, é imprescindível o conhecimento das características hidráulicas de todos seus componentes. No caso da microaspersão, os emissores constituem os elementos de maior importância. São comumente definidos como uma estrutura mecânica utilizada para dissipar a pressão da água nas tubulações laterais, de modo que possibilite a distribuição da vazão de forma freqüente, uniforme e constante (MATOS; RAGOSO, 1997). Os estudos de hidráulica de microtubos são, normalmente, realizados sob regime de escoamento laminar (KHATRI et al., 1979; ISHAQ; IBRAHIM, 1995; SOUZA; BOTREL, 2004), e poucos trabalhos analisaram-nos sob regime de escoamento turbulento (KHATRI et al., 1979; BHATNAGAR; SRIVASTAVA, 2003).

A relação vazão-pressão, a perda de carga ao longo da linha lateral e no emissor e o percurso da água no mesmo, constituem algumas características hidráulicas que influenciam diretamente o desempenho do sistema. Essas características dependem do tipo do emissor, do material, do processo de fabricação e da forma de conexão do emissor na linha lateral. Segundo Keller e Karmeli (1974) a vazão de um emissor em função da sua pressão de operação, pode ser ajustada através de uma função potência, cuja vazão se relaciona diretamente com a carga

hidráulica atuante na entrada do emissor. Para que a vazão do microtubo seja estimada com precisão, é necessário que se utilize uma equação que correlacione vazão, comprimento, pressão na entrada do microtubo e diâmetro (SOUZA; BOTREL, 2004).

O objetivo principal desta etapa do trabalho foi desenvolver e avaliar um novo modelo de microaspersor de baixo custo, o qual usa microtubos como emissores. Modelos empíricos foram desenvolvidos para dimensionar o sistema de irrigação proposto, baseado na caracterização hidráulica de alguns microtubos para serem utilizados como emissores. O objetivo específico foi verificar a validade destes modelos.

O modelo proposto baseia-se na determinação do comprimento do microtubo em função da estimativa da pressão em cada ponto de inserção do emissor, considerando vazão constante ao longo da linha lateral, emissores igualmente espaçados e compensação da perda de carga que ocorre na lateral, através da variação no comprimento dos microtubos ao longo desta.

4.2 Material e Métodos

Para identificar e caracterizar hidraulicamente os microtubos a serem utilizados como emissores realizaram-se diversos ensaios, inter-relacionando os parâmetros vazão, pressão e comprimento do microtubo. Uma bancada de ensaios foi montada no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, para a realização destes ensaios (Figura 3). Todos os ensaios realizados seguiram as normas técnicas para métodos de ensaio de equipamentos de irrigação da ABNT (2006).

No desenvolvimento do modelo empírico para o dimensionamento do emissor proposto, assumiu-se que o diâmetro interno dos microtubos eram aqueles determinados hidrodinamicamente em laboratório e que, a equação de Blasius estima adequadamente o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach. Neste experimento foram utilizados microtubos de polietileno, fabricados para uso em irrigação pela Plasnova, com diâmetro interno nominal de 1,0 e 1,5 mm e diâmetro hidraulicamente determinado (capítulo 3) de 1,07 e 1,50 mm, respectivamente. A vazão nominal calculada para cada microtubo, considerando uma velocidade de escoamento de 10 m s^{-1} no emissor, é respectivamente: 30 e 60 L h^{-1} .

Na bancada de ensaios o abastecimento de água para o sistema ocorreu por bombeamento de um reservatório com capacidade de 18000 L. A água após passar por um filtro de disco era conduzida por uma tubulação de polietileno de baixa densidade com 13 mm de diâmetro interno, na qual, foram conectados os emissores. No início e no final desta tubulação foi instalado um manômetro eletrônico, com precisão de 1 kPa e um registro de agulha para controle da pressão. Os microaspersores utilizados eram compostos por microtubos conectados a um cabo extensor (com diâmetro interno de 3,8 mm) semelhante à instalação da linha lateral no campo, através de um conector confeccionado em PVC, especialmente para este propósito (Figura 3b). A distância entre conexões dos emissores adjacentes foi de aproximadamente 20 cm, visando evitar a influência das causas perturbadoras no escoamento. Durante os ensaios, três microaspersores foram colocados em funcionamento simultaneamente.

Figura 3 - Esquema da bancada de ensaios. 3a - instalação do tubo na linha lateral; 3b - detalhe do conector de PVC e 3c - coleta da vazão

Uma planilha do Microsoft Excel foi elaborada para estimar a pressão de serviço em função do comprimento do microtubo, representada pelo fluxograma esquematizado na Figura 4 e descrito a seguir. Foi estabelecido pelos autores que, a amplitude da pressão de alimentação seria de 90 a 230 kPa. Esta faixa corresponde à pressão de serviço da maioria dos microaspersores comerciais, além disso, a maioria dos emissores de longo percurso, sob regime de escoamento turbulento, necessita de uma pressão de operação de no mínimo 90 kPa para obter ótimo desempenho (BHATNAGAR; SRIVASTAVA, 2003). Na mesma planilha calculou-se o comprimento máximo e mínimo de cada microtubo, além disso, foram acrescidos e reduzidos 10% ao tamanho máximo e mínimo, respectivamente. Visando obter mais pontos na curva, dividiu-se a diferença entre o comprimento máximo e mínimo corrigidos por seis. Desse modo, sete tamanhos de microtubo foram utilizados para ajustar a curva, uma vez que a diferença entre

o comprimento máximo e mínimo (ΔL) foi descontada do comprimento máximo, obtendo-se um segundo tamanho, do qual também foi subtraído um ΔL e assim sucessivamente até o sétimo. De posse destes valores calculou-se qual pressão seria necessária para obter a vazão nominal para cada microtubo e comprimento calculado.

A pressão de serviço, para cada um dos sete tamanhos de microtubos, foi calculada com a equação de Darcy-Weisbach de perda de carga e o fator (f) através da equação de Blasius, adicionando-se a energia de velocidade e a perda de carga no cabo extensor. Os pares de valores comprimento e pressão foram utilizados como base, na bancada de ensaio, para encontrar a equação que relaciona vazão e pressão de cada microtubo para cada tamanho.

A medida gravimétrica da vazão foi realizada durante três minutos, conforme norma técnica para ensaios da ABNT (2006), para cada microtubo e comprimento sob três pressões: a pressão de serviço estimada pela planilha e dois outros pontos aproximadamente 30 kPa acima e abaixo dela. O peso foi transformado em volume ao dividi-lo pelo peso específico da água, determinado em função da temperatura da água, medida a cada leitura de vazão. Para evitar erros sistemáticos, bem como, reduzir os erros de medição da vazão, cada determinação foi repetida três vezes. Após cada coleta foi calculada a vazão, a fim de verificar se realmente a vazão nominal desejada estava dentro do intervalo estimado e ensaiado. Caso contrário, o ensaio era repetido, tentando buscar uma determinada pressão que fornecesse a vazão nominal calculada para aquele microtubo. Com os valores médios de vazão, das três repetições, realizou-se uma análise de regressão ajustando a curva pressão-vazão com três pontos, para cada um dos sete comprimentos dos microtubos, através da eq. (1) rearranjada, de modo que H tornou-se a variável independente ($H = aQ^b$). Nestas equações, substituiu-se “Q” pelo valor da vazão nominal calculada para cada microtubo, para determinar a pressão de serviço, específica para aquele comprimento e diâmetro do microtubo.

Os sete pares de pressão de serviço calculada e tamanho dos microtubos foram ajustados em uma função linear. A equação resultante deste ajuste define o comprimento do microtubo em função da pressão no ponto de inserção do emissor na linha lateral. Portanto, esta é a equação que guia o dimensionamento do sistema de irrigação por microaspersão com microtubos.

(continua)

Figura 4 - Fluxograma para estimar a pressão em função do comprimento do microtubo

(conclusão)

Figura 4 - Modelo proposto para estimar a pressão em função do comprimento do microtubo

A descrição detalhada da metodologia proposta para obtenção da equação comprimento-pressão é apresentada no Anexo B.

Numa etapa seguinte, foi realizada a análise teórica do modelo empírico desenvolvido. Esta análise foi realizada de acordo com as seguintes considerações: na faixa do regime de escoamento turbulento o fator de atrito (f) foi estimado através das equações de Barr, Bagarello et al. (1995) e Cardoso, Frizzzone e Rezende (2008); os diâmetros dos microtubos utilizados, foram de acordo com o catálogo do fabricante e a avaliação da perda de carga localizada, causada pela inserção do conector na linha lateral, foi considerada relevante.

Para o sistema de irrigação proposto nesta pesquisa, a aplicação da equação de energia, desde o ponto de inserção do microaspersor na linha lateral, até o ponto de saída de água resulta em:

$$H_p = k_e \frac{V_e^2}{2g} + hf_e + k_c \frac{V_m^2}{2g} + hf_m + \frac{V_m^2}{2g} + z \quad (20)$$

em que:

H_p = carga de pressão no ponto de inserção do microaspersor, m;

V_e = velocidade de escoamento no tubo extensor, $m\ s^{-1}$;

V_m = velocidade de escoamento no microtubo, $m\ s^{-1}$;

hf_e = perda de carga no tubo extensor, m;

hf_m = perda de carga no microtubo, m;

k_e = coeficiente de perda de carga na entrada do tubo extensor, adimensional;

k_c = coeficiente de perda de carga devido à contração do diâmetro do tubo extensor para o microtubo, adimensional;

z = energia potencial ao longo da lateral, m.

Reunindo todos os termos referentes à perda de carga localizada em apenas uma constante, temos:

$$H_p = hf_e + hf_m + k \frac{V_m^2}{2g} + z \quad (21)$$

em que:

k = constante de perda de carga localizada.

As perdas de carga (hf_e e hf_m) foram determinadas utilizando-se a equação de Darcy-Weisbach (eq. 14) e o fator de atrito (f), sob regime de escoamento laminar, é expresso como uma função linear do número de Reynolds (eq. 16).

A comparação entre os valores de pressão medidas (H_{med}) e estimadas (H_{est}) foi obtida através do Erro Médio Quadrático (EMQ). No cálculo do EQM é necessário calcular o quadrado das diferenças entre o valor da pressão estimada e observada, ou seja, consiste da média aritmética quadrática dos erros absolutos, a qual tem aplicação quando o sentido do afastamento em torno da média aritmética não é importante. O EQM é dado através da seguinte equação:

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum (H_{med} - H_{est})^2}{n}} \quad (22)$$

A metodologia para determinação da equação teórica que relaciona comprimento-pressão para qualquer tipo e diâmetro de microtubo está descrita no Anexo C.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Cálculos preliminares ao ensaio

A Tabela 6 apresenta os resultados da planilha do Microsoft Excel antes de iniciar os ensaios, correspondentes ao fluxograma apresentado na Figura 4. Nesta Tabela podem ser obtidos os comprimentos, máximo e mínimo, de cada microtubo e o respectivo ΔL . Os dados de saída desse fluxograma são apresentados na Tabela 7, na qual se tem o valor da pressão de serviço estimada para cada microtubo em cada um dos sete comprimentos dos microtubos utilizados. Estes dados são a base dos ensaios realizados em laboratório, visando obter as relações pressão-vazão e comprimento-pressão.

Tabela 6 - Resultados dos cálculos preliminares que estimou a pressão de serviço em função do comprimento do microtubo

D (mm)	Vazão (L h ⁻¹)	Vazão (L h ⁻¹) Arredondada	Velocidade (m/s)	Hf _{cabo} (m)	Hf _{total} (m)	
					Máx	Mín
1,07	32,37	30	9,27	0,16	20,46	5,46
1,50	63,62	60	9,43	0,53	19,94	4,94

D (mm)	f (Blasius)	Comprimento (cm)		Comprimento corrigido (cm)		ΔL (cm)
		Máx	Mín	Máx	Mín	
1,07	0,0317	15,76	4,21	17,34	3,79	2,26
1,50	0,0290	22,71	5,62	24,98	5,06	3,32

Tabela 7 - Pressão estimada em função do comprimento, para cada microtubo, com vazão nominal

	Diâmetro dos microtubos (mm)			
	1,07	1,50	1,07	1,50
	Comprimento (cm)		Pressão estimada (kPa)	
L (1)	17,3	25,0	265,2	264,7
L (2)	15,1	21,7	236,5	236,1
L (3)	12,8	18,3	207,7	207,6
L (4)	10,6	15,0	179,0	179,0
L (5)	8,3	11,7	150,2	150,4
L (6)	6,1	8,4	121,5	121,8
L (7)	3,8	5,1	92,7	93,2

4.3.2 Equações características dos emissores

A relação entre o fator de atrito (f) calculado através da equação proposta por Blasius e o Número de Reynolds (Re) é apresentada na Figura 5. O Re foi calculado utilizando as vazões coletadas para uma dada relação vazão-pressão-comprimento do emissor. Verifica-se que para ambos emissores o regime de escoamento foi plenamente turbulento, variando de 2400 a 8500 para o microtubo com 1,07 mm de diâmetro interno e de 12000 a 17000 para o microtubo com 1,50 mm de diâmetro.

Figura 5 - Relação f - Re para os microtubos estudados

Os resultados dos ensaios de laboratório (vazão e pressão) foram correlacionados visando obter a equação característica de cada microtubo emissor. As curvas características, resultantes da relação vazão-pressão para cada comprimento ensaiado dos microtubos, estão apresentadas na Figura 6. As respectivas funções potência, ajustadas através de análise de regressão estão listadas na Tabela 8. Nesta, observa-se ainda os elevados coeficientes de ajuste encontrados, resultado este que corrobora as análises de Keller e Karmeli (1974) quanto ao tipo de função que melhor correlaciona vazão-pressão para emissores de sistemas de irrigação.

Figura 6 - Curvas ajustadas representando a relação entre vazão e pressão para cada tamanho (L) e diâmetro (D) de microtubo

A vazão dos emissores variou durante os ensaios entre 24,37 e 33,46 L h⁻¹, para o microtubo com 1,07 mm de diâmetro e de 47,07 a 65,36 L h⁻¹, para o microtubo com 1,50 mm, sob três diferentes pressões. O expoente da vazão dos emissores, que caracteriza o regime de escoamento, está dentro do intervalo correspondente ao regime de escoamento turbulento (Tabela 8).

Tabela 8 - Equações características dos microtubos

Comprimento (cm)	Equação vazão-pressão	R ²	Coefficiente exponencial da vazão - x
D = 1,07 mm			
17,34	$H = 0,6120q^{1,7880}$	0,9987	0,56
15,08	$H = 0,5348q^{1,7995}$	0,9999	0,56
12,82	$H = 0,3852q^{1,8648}$	0,9988	0,54
10,56	$H = 0,3663q^{1,8667}$	1	0,54
8,30	$H = 0,3095q^{1,8671}$	1	0,54
6,05	$H = 0,2867q^{1,8466}$	0,9971	0,54
3,79	$H = 0,2017q^{1,9101}$	0,9994	0,52
D = 1,50 mm			
24,98	$H = 0,1537q^{1,8390}$	1	0,54
21,66	$H = 0,0728q^{2,0032}$	0,9971	0,50
18,34	$H = 0,1455q^{1,8059}$	1	0,55
15,02	$H = 0,0824q^{1,9134}$	0,9975	0,52
11,70	$H = 0,0780q^{1,8880}$	0,9946	0,53
8,38	$H = 0,0707q^{1,8761}$	1	0,53
5,06	$H = 0,0693q^{1,8289}$	0,9963	0,55

Ao substituir os respectivos valores da vazão nominal, em L h⁻¹, nas equações da Tabela 8 encontram-se os valores da pressão de serviço (kPa) determinados experimentalmente para cada tamanho dos respectivos microtubos. Assim, pode-se comparar o valor de pressão estimado (Tabela 7) com o observado, o que permitiu a verificação da metodologia proposta. A comparação foi realizada através de um ajuste regressão linear no software Table Curve, através da equação $y = ax$, inserida no programa. Os resultados gráficos e as respectivas equações são apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Relações entre pressões observadas (H_{obs}) e estimadas (H_{est}) pelo modelo teórico

Em geral, a relação entre a pressão medida experimentalmente e a estimada, baseada no modelo proposto por este estudo, resultou em uma linha reta com coeficiente angular próximo a 1,0. Portanto, o modelo proposto para estimar a pressão em função do comprimento do microtubo (Figura 4) está sutilmente subestimando o valor experimental da pressão. Especificamente para o microtubo de 1,07 mm de diâmetro interno tem-se que, a pressão observada corresponde a 91 % da estimada, ou seja, o modelo subestima a pressão real em 9 %, com 90,6 % de precisão e não diferem significativamente, a 5 % de probabilidade pelo teste F, dos valores calculados pela equação proposta (Figura 4). Para o outro microtubo estudado (1,50 mm), a pressão obtida no ensaio corresponde a 87 % da estimada. Neste caso, o modelo está subestimando a pressão observada em 13 %, com 97,2 % de precisão e não diferem significativamente, a 1 % de probabilidade pelo teste F, dos valores estimados.

4.3.3 Relação comprimento-pressão

De posse dos valores de pressão observados, correlacionaram-nos com os respectivos comprimentos de cada microtubo, resultando numa equação linear que relaciona pressão nominal e comprimento (eq. 23). Estas equações definem o comprimento requerido dos microtubos em

função da pressão no ponto de inserção na linha lateral (Figura 8), para o dimensionamento do sistema de irrigação por microaspersão proposto.

$$L = aH - b \quad (23)$$

em que:

L = comprimento do microtubo, cm;

H = pressão no ponto de inserção do emissor, kPa.

Figura 8 - Relação pressão (H)-comprimento (L) dos microtubos estudados

4.3.4 Análise teórica do modelo proposto

As equações empíricas apresentadas na Figura 8 foram desenvolvidas considerando dois diâmetros de microtubos e suas respectivas vazões nominais. Para outros diâmetros de microtubos e vazões, uma equação geral pode ser desenvolvida em bases teóricas.

A dificuldade de aplicação da eq. (20), com $z = 0$, no sistema proposto neste estudo, é estimar os coeficientes de perdas de carga contínua e localizada. Entretanto, neste sistema, duas perdas de energia tendem a dominá-lo: a perda de carga por contração entre o cabo extensor e o microtubo; e a perda de carga contínua dentro do microtubo. Outro importante componente é a energia cinética do jato de água que sai do microtubo (eq. 21). Por outro lado, tanto a perda de carga na entrada no emissor, como a perda de carga contínua no cabo extensor podem ser

negligenciadas, devido aos seus baixos valores, que correspondem de 2 a 3 % da perda de carga total e assim pouco interferem no funcionamento do sistema.

A obtenção do melhor ajuste para os coeficientes em questão, feito de acordo com a análise teórica dos dados obtidos para os dois microtubos, será descrita a seguir. Para calcular a perda de carga contínua no cabo extensor, o fator de atrito (f) foi estimado usando a equação para tubos lisos (eq. 9). Uma rotina de otimização foi realizada, na qual, se variou o fator de fricção do microtubo (valores múltiplos do valor para tubos lisos) e o coeficiente de perda de carga devido à contração para minimizar o EQM (eq. 22) entre as pressões estimadas e medidas.

Os resultados mostraram que o melhor ajuste do fator de fricção (f) foi de 91 % do valor da perda de carga obtida com o (f) calculado pela equação para tubos lisos (eq. 9), o qual resultou em um EQM de 1,037 m (Figura 9).

Quando a análise teórica é realizada nos dados de cada microtubo individualmente, surgem consideráveis diferenças. O valor do fator de fricção (f), para o microtubo de 1,50 mm de diâmetro, é muito próximo daquele valor obtido com a equação para tubo liso. No entanto, a análise para o microtubo com 1,07 mm de diâmetro foi 81 % do valor obtido com a equação para tubo liso.

Figura 9 - Comparação entre pressão (H) estimada e medida baseada no modelo semi-empírico

A interpretação destes resultados é mais bem ilustrada pela sensibilidade do fator de fricção (f) aos possíveis erros nos valores de diâmetro do microtubo utilizado. No caso do microtubo com 1,07 mm, uma redução de 2 % no valor do diâmetro, melhora o ajuste do fator de fricção (f) em até 20 % em relação ao valor obtido com a equação para tubos lisos.

4.4 Conclusões

O modelo empírico estimou a pressão em função do comprimento do microtubo com bastante precisão.

A metodologia proposta oferece a possibilidade de ajustar quaisquer variações na pressão de alimentação ou na topografia para obter vazão constante ao longo da linha lateral.

O modelo empírico sugerido ajusta o comprimento do microtubo visando atender igualmente o requerimento da cultura.

A análise teórica do modelo indicado destacou a importância da precisão na medida do diâmetro dos microtubos utilizados neste sistema, bem como a incerteza na estimativa do fator de fricção (f) para estes tubos.

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. 13 p.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow-resistance law for small-diameter plastic pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 121, n. 5, p. 313-316. Sept./Oct. 1995.

BHATNAGAR, P.R.; SRIVASTAVA, R.C. Gravity-fed drip irrigation system for hilly terraces of the northwest Himalayas. **Irrigation Science**, Berlin, v. 21, n. 4, p. 151-157, Jan. 2003.

CARDOSO, G.G.G.; FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum – Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 3, p. 299-305, jun. 2008.

ISHAQ, A.M; IBRAHIM, M.A. The design of trickle irrigation systems with microtubes as emitters. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MICROIRRIGATION, 5., 1995, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ASAE, 1995. p. 708-716.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 678-684, July/Aug. 1974.

KHATRI, K.C.; WU, I.; GITLIN, H.M.; PHILLIPS, A. Hydraulics of microtube emitters. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 105, n. IR2, p. 167-173, June 1979.

MATOS, J.A.; RAGOSO, C.R.A. Caracterização da performance hidráulica de dois emissores tipo microaspersor. **Agriambi**, Campina Grande, v. 1, p. 17-20, set./dez. 1997.

SOUZA, R.O.R.M.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Agriambi**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 16-22, jan./abr. 2004.

5 DESENVOLVIMENTO DO DEFLETOR PARA O MICROASPERSOR

Resumo

A microaspersão foi idealizada para locais onde se necessita de um bulbo molhado, de maiores dimensões, para que atendam às necessidades mínimas de área ocupada pelo sistema radicular. Os objetivos desta etapa do trabalho foram: desenvolver um defletor para o microaspersor com microtubos fácil de se construir; avaliar o perfil de precipitação e a distribuição espacial da água. Foram desenvolvidos dois modelos de defletores, com algumas variações quanto ao ângulo de inclinação do anteparo. Os modelos propostos foram em forma de “F”, com inclinações do defletor de impacto de 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30° e em forma de “C”. Dentre os modelos desenvolvidos, aquele que melhor atendeu as expectativas foi em forma de “C”, principalmente no que se refere à facilidade construtiva. Este defletor consiste em um tubo de PVC com diâmetro de 16 mm ($\frac{3}{4}$ ”) cortado em anéis e posteriormente cortado em um determinado ângulo visando obter uma melhor distribuição. Além disso, foi possível padronizar a construção deste modelo enquanto que, diferentemente do modelo tipo “F”. O CUC foi o coeficiente utilizado para avaliar o coeficiente de distribuição do modelo proposto. O microtubo com 1,07 mm de diâmetro com o defletor tipo “C” foi ensaiado em ambiente fechado, na ausência de ventos. O perfil tridimensional de distribuição mostrou baixa precipitação próximo ao microaspersor, seguido de maiores valores em pontos intermediários ao microaspersor (até 0,6 m), os quais diminuem à medida em que se distanciava deste. Para este perfil de distribuição, obteve-se coeficientes de uniformidade da ordem de 20,8; 19,3 e 16,7 %, nas condições de espaçamento utilizado neste ensaio. Para irrigação em culturas de maior espaçamento e de grande extensão do sistema radicular o modelo do microaspersor proposto nesta pesquisa trabalha sem sobreposição dos jatos de água, o que justifica a aceitabilidade do valor do CUC encontrado para distribuição espacial. No entanto, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas que estudem outros defletores que proporcionem melhor distribuição espacial.

Palavras-chave: Anteparo; Irrigação localizada; CUC; Perfil de distribuição; Distribuição espacial

Abstract

DEVELOPMENT OF A DEFLECTOR TO MICRO-SPRINKLER

The micro-sprinkler irrigation system was idealized for crops where it needs a larger wetted bulb, to meet the minimum needs of area occupied by the root system. The objectives at this stage of work were to develop a deflector for micro-sprinkler with microtube easily constructed; to evaluate precipitation profile and spatial distribution of water. Two models of deflectors, with some variations on the inclination angle were developed. The models had shape of "F", with

slopes of the impact deflector of 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° and 30° and "C" were proposed. Among the models developed, that one showed best results was "C", particularly regard to be easily constructed. This deflector consists of a PVC pipe 16 mm ($\frac{3}{4}$ ") diameter, which is cut rings and then it, is cut into a certain angle to reach better distribution. Moreover, it was possible to standardize its construction unlike of "F" model. The CUC was the factor used to measure the coefficient of distribution of the proposed model. The microtube 1.07 mm diameter with the "C" deflector was tested in the absence of wind. The 3-D profile of distribution presented low precipitation near the micro-sprinkler, followed by major values in middle points to micro-sprinkler (up to 0.6 m), after this point they decreased. Uniformity coefficients to spacing used in this case were 20.8; 19.3 e 16.7%. The micro-sprinkler proposed runs without overlap on the field, especially to crops that grow longer spacing and has big root zone, which justifies the acceptability of the CUC value found. However, recommends to the development of research to evaluate other deflectors that provide better spatial distribution.

Keywords: Trickle irrigation; CUC; Distribution profile; Spatial distribution

5.1 Introdução

Um dos principais parâmetros em avaliações do desempenho de um sistema de irrigação por aspersão ou microaspersão, é a uniformidade de distribuição de água. No caso de microaspersão pode-se distinguir dois fatores a serem considerados na uniformidade de distribuição da água. Um deles é a uniformidade da vazão dos emissores, o outro é a uniformidade de distribuição espacial da precipitação.

Quando se irriga árvores ou arbustos, cultivados com maiores espaçamentos, normalmente usa-se um ou mais microaspersores por planta. Neste caso, a uniformidade da vazão dos emissores irá definir a qualidade da irrigação e, portanto a distribuição espacial da precipitação terá importância secundária. Por outro lado, em cultivos em que se utiliza um emissor para duas ou mais plantas, além da uniformidade de vazão, a distribuição espacial da água deve ser considerada relevante. Para exemplificar, suponha um sistema de irrigação por microaspersão que utiliza um emissor por planta e irriga com elevada uniformidade de vazão e baixa uniformidade de distribuição espacial de água. Neste cenário, a quantidade de água aplicada por planta está de acordo com a requerida, ou seja, a irrigação possui eficiência satisfatória. Em outra situação, em que se utiliza um microaspersor para duas ou mais plantas, a desuniformidade da distribuição espacial de água implica em desuniformidade da quantidade de água por planta, comprometendo assim a eficiência do sistema.

Sistemas de irrigação bem dimensionados e uniformes na distribuição de água aplicada são fundamentais para as técnicas de quimigação, resultando em aumento da produtividade. Na microaspersão, como a aplicação da água é sob forma de pequenas gotículas, sua distribuição é sensivelmente afetada pela velocidade do vento, resultando na desuniformidade do perfil de distribuição (DANTAS NETO, et al., 1997). O ensaio de distribuição pluviométrica caracteriza e determina o funcionamento do microaspersor sobre uma superfície irrigada. As curvas pluviométricas indicam a precipitação por unidade de tempo, enquanto que as isoietas delimitam a área molhada por diferentes precipitações (NASCIMENTO; SOARES; AZEVEDO, 1999). A distribuição da água aplicada caracteriza todo o sistema de irrigação e tem efeitos diretos, tanto no projeto como no seu funcionamento.

As medidas de uniformidade expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo. Uma forma usual de obtê-las é por medidas de dispersão, expressando-as de forma adimensional, pela comparação com o valor médio. Existem várias equações que podem ser utilizadas para medir esta dispersão, como por exemplo, as propostas por Christiansen (1942) e posteriormente por Wilcox e Swailes (1947). Destes, o coeficiente mais conhecido e largamente utilizado é o de Christiansen, que adotou o desvio médio como medida de dispersão.

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum |q_i - q_m|}{n q_m} \right) \quad (24)$$

em que:

q_i = vazão de cada coletor, $L h^{-1}$;

q_m = vazão média, $L h^{-1}$;

n = número de observações.

Este coeficiente foi inicialmente desenvolvido para avaliar sistemas de irrigação por aspersão, mas como a microaspersão, apesar de ser um sistema localizado, apresenta características hidráulicas e de operação, muito próximas da aspersão convencional (SILVA; SILVA, 2005), os mesmos procedimentos podem ser adotados. No entanto, deve-se considerar que a microaspersão, diferente da aspersão, poderá ser utilizada localizadamente para cada planta, o que permite reduzir a importância da distribuição espacial da água, sem comprometer a eficiência do sistema.

A microaspersão foi idealizada para substituir o gotejamento em áreas de frutíferas cultivadas em solos arenosos, onde se necessita de um bulbo molhado, de maiores dimensões, para que atendam às necessidades mínimas de área molhada (MATOS; RAGOSO, 1997). Além disso, em tal situação não há necessidade de se molhar toda área, ou seja, de sobreposição dos jatos dos microaspersores, como ocorre com a aspersão convencional. Por conseguinte, os microaspersores comerciais em geral, possuem baixa uniformidade de distribuição espacial de água, porém, este é um problema possível de ser contornado na prática. Vale ressaltar que, é mais importante fornecer à planta quantidades iguais de água, do que distribuí-la perfeitamente e com grandes variações de vazão na linha lateral. A desuniformidade em sistemas por microaspersão é caracterizada pelo fato da elevada precipitação próximo a base dos emissores, atingindo nas extremidades de alcance do jato, valores muito pequenos, chegando-se a praticamente zero (SILVA; SILVA, 2005).

O objetivo desta etapa do trabalho foi desenvolver um defletor para o microaspersor com microtubos e determinar sua distribuição espacial de água através do perfil de distribuição de água e da sua uniformidade. A idéia elementar consistiu em desenvolver um defletor com boa distribuição espacial, vinculada à facilidade construtiva do mesmo.

5.2 Material e Métodos

Os defletores foram construídos no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, em Piracicaba – SP, assim como a condução dos ensaios de distribuição. Inicialmente foi construído um anteparo em forma de “F” no qual o microtubo foi inserido. O defletor de impacto possuía diferentes ângulos de inclinação (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30°), selecionados para obter melhor distribuição espacial da água. Outro modelo avaliado foi um defletor em forma de “C”. Ambos foram fabricados em PVC, sendo que o primeiro foi oriundo de uma placa de 6 mm e o segundo de um tubo com diâmetro de 16 mm ($\frac{3}{4}$ ”) cortado em anéis. Os projetos dos defletores foram precisamente desenhados no AutoCAD, conforme Figura 10.

Figura 10 - Desenho esquemático para construção dos defletores propostos

Para a construção em maior escala encontrou-se grandes dificuldades de se reproduzir o defletor tipo “F”, logo o mesmo não foi utilizado nos ensaios de distribuição espacial de água. No caso do defletor tipo “C”, foram desenvolvidos dois moldes para confecção em grande escala (Figura 11). Conseqüentemente, padronizou-se a largura de corte do anel e do “C”, bem como o local e ângulo do orifício onde o microtubo foi inserido. Para o furo foi utilizada uma broca metálica de 2,3 mm de diâmetro, que produzia um orifício adequado ao diâmetro externo dos microtubos (2,5 mm).

Figura 11 - Fotos da construção do anteparo do microaspersor tipo “C” no laboratório e seu funcionamento

Os ensaios para determinação do perfil pluviométrico e do raio de alcance do jato do microaspersor foram realizados em ambiente fechado, na ausência de ventos. O microtubo de 1,07 mm de diâmetro interno foi utilizado e seu comprimento foi calculado através da eq. (23) para uma dada pressão, controlada por uma válvula reguladora. Foi instalado também um manômetro digital com precisão de 1 kPa, para o monitoramento da pressão desejada. O microaspersor foi conectado a um tubo de polietileno de 16 mm de diâmetro nominal e todo sistema foi acoplado a um conjunto motobomba, com filtro de tela na saída da bomba.

Para determinar a uniformidade, foram utilizados coletores (10 cm de altura e 8,1 cm de diâmetro), provenientes do kit destinado a ensaios de uniformidade de distribuição espacial da água produzidos pela FABRIMAR. Os coletores foram distribuídos a partir do microaspersor, de forma equidistante, perfazendo um total de 216. Após uma hora de funcionamento, foram feitas as leituras dos volumes de água contidos em cada coletor, com o uso de provetas graduadas de precisão de 0,2 mL. A precipitação foi coletada três vezes nas mesmas condições de espaçamento e altura do microaspersor (50 cm). Os coletores foram dispostos num espaçamento de 20 cm formando uma malha quadricular em torno do microaspersor, a qual cobriu uma distância superior ao alcance do jato do emissor. O tipo do defletor condicionou uma distribuição em formato de leque por isso, duas linhas de coletores foram especialmente espaçadas em 10 cm e montadas conforme Figura 12.

Figura 12 - Ensaio de distribuição espacial da água do microaspersor com o defletor tipo “C” em laboratório

A lâmina foi calculada através do volume coletado dividido pela área do coletor. Com os valores de precipitação, procedeu-se a representação gráfica da distribuição de água na superfície irrigada e determinou-se o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (eq. 24).

Utilizou-se uma planilha do Excel, para o cálculo do CUC para cada uma das três leituras de precipitação. Foram confeccionados mapa de isoietas e o perfil tridimensional de distribuição espacial para melhor visualização da situação encontrada, através do software Surfer v. 8. As isoietas delimitaram a área molhada pelas diferentes precipitações.

5.3 Resultados e Discussão

As primeiras peças fabricadas mostraram certo grau de dificuldade em uniformizar replicações do defletor tipo “F”, apesar da boa distribuição espacial observada visualmente e bom diâmetro molhado (Figura 13). Tal fato exigiu maior aprofundamento na etapa de fabricação, a qual deveria ser mais simples de modo que as replicações fossem construídas com facilidade, atendendo assim nosso objetivo principal nesta etapa do trabalho. O resultado visual inicial do defletor tipo “C” também se mostrou bastante promissor (Figura 14).

No perfil pluviométrico do microaspersor com o defletor tipo “C” mostrou certa deformação quanto à forma triangular comum para microaspersores (Figura 15). Observam-se valores baixos próximos ao microaspersor, seguidos de maiores valores de precipitação em distâncias intermediárias do microaspersor (até 0,6 m), diminuindo na medida em que se distanciou deste.

Na Figura 16 estão representados os perfis tridimensionais de distribuição e o mapa de isoietas para cada uma das três repetições realizadas. A uniformidade de distribuição em toda área de aplicação é mais bem visualizada pelo gráfico de isoietas, cujo grau de proximidade das linhas indica a variação de precipitação (ROCHA et al., 2001). Para o defletor avaliado, obtiveram-se três valores para o coeficiente de uniformidade de Christiansen, 20,8 %, 19,3 % e 16,7 %, respectivamente para cada repetição, nas condições de espaçamento utilizado neste ensaio.

O valor do CUC está bem próximo ao encontrado com microaspersores comerciais na literatura. Holanda Filho et al. (2001) avaliando o microaspersor Rondo (Plastro) encontraram um

CUC de 11,2 %, Nascimento, Soares e Azevedo (1999) encontraram em seus estudos com o microaspersor Rain-Bird QN-14, um coeficiente de 15,4 %, ambos em condições semelhantes de ensaios e Souza et al. (2003) avaliando o microaspersor DAN-2001 encontrou um coeficiente de 27,2 %. Deve-se salientar também que, em condições de campo o modelo do microaspersor proposto nesta pesquisa trabalha sem sobreposição dos jatos de água, o que justifica a aceitabilidade do valor do CUC encontrado. Os moldes construídos para corte e furo do defletor tipo “C”, mostraram-se bastante eficientes no que se refere à padronização dos defletores produzidos, bem como em termos de facilidade de fabricação.

Figura 13 - Fotos de ensaios com o defletor do microaspersor tipo “F” com várias angulações

Figura 14 - Microaspersor com detalhe para o defletor tipo “C” e funcionando em campo

Figura 15 - Perfil pluviométrico do microaspersor com o defletor tipo “C” em laboratório

(continua)

Figura 16 - Gráfico de isoieta e perfil tridimensional da distribuição de água na superfície do solo, pelo microaspersor com o defletor tipo “C” em laboratório

(conclusão)

Figura 16 - Gráfico de isoietas e perfil tridimensional da distribuição de água na superfície do solo, pelo microaspersor com o defletor tipo “C” em laboratório

5.4 Conclusões

O conhecimento da distribuição pluviométrica do microaspersor permite a adaptação e introdução de mudanças na construção do defletor.

Baseado nos resultados obtidos com os ensaios de distribuição espacial da água, e supondo uma situação em que se utilize um microaspersor para duas ou mais plantas, pode-se afirmar que é necessário estudar alternativas para o modelo do defletor, em termos de planejamento e construção, visando elevar seu coeficiente de distribuição, inclusive em termos de sobreposição de jatos.

O raio de alcance proporcionado pelo emissor está adequado para uso em irrigação de culturas cultivadas com maior espaçamento, bem como onde se utilize um ou dois emissores por planta.

Os conhecimentos produzidos a partir deste trabalho representam o ponto de partida para a concepção, avaliação e implementação do uso de microtubos na microaspersão.

Referências

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).

DANTAS NETO, J.; MEDEIROS, M.G.A.; AZEVEDO, A.A.V.; AZEVEDO, H.M. Performance hidráulica e perfil de distribuição de água do microaspersor NAAN 7110, sob diferentes condições de vento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 57-61, set./dez. 1997.

HOLANDA FILHO, R.S.F.; PORTO FILHO, F.Q.; MIRANDA, N.O.; MEDEIROS, J.F. Caracterização hidráulica do microaspersor Rondo, da Plastro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 16-21, jan./abr. 2001.

MATOS, J.A.; RAGOSO, C.R.A. Caracterização da performance hidráulica de dois emissores tipo microaspersor. **Agriambi**, Campina Grande, v. 1, p. 17-20, set./dez. 1997.

NASCIMENTO, T.; SOARES, J.M.; AZEVEDO, C.A.V. Uniformidade de distribuição de água na superfície e no perfil do solo irrigado com o microaspersor Rain-Bird QN-14. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 304-308, set./dez. 1999.

ROCHA, F.A.; CÉSAR, J.H.F.; MELLO, C.R.; ROCHA, F.S.; PEREIRA, G.M. Caracterização hidráulica de três modelos de miniaspersor Mankad autocompensante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 6-9, jan./abr. 2001.

SILVA, C.A.; SILVA, C.J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, ano 4, n. 8, 2005. Disponível em: <<http://www.revista.inf.br/agro/artigos/artigo08.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2006.

SOUZA, R.O.R.M.; LUCAS, A.T.; RIGHI, E.Z.; COELHO, R.D.; CONCEIÇÃO, M.A.F. Influência da inclinação da haste e da ação do vento no desempenho do microaspersor DAN-2001. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 64-77, jan./abr. 2003.

WILCOX, J.C.; SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, Ottawa, v. 27, n. 11, p. 565-583, Jan./Dec. 1947.

6 AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DA VAZÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO COM MICROTUBOS

Resumo

A uniformidade de aplicação de água através de um sistema de irrigação localizada é extremamente afetada pelo dimensionamento hidráulico. A variação da vazão do emissor deve-se as diferenças de pressão causadas pela perda de energia devido à fricção, como também, pela declividade do terreno. Este capítulo apresenta o desempenho de modelo de microaspersor proposto com o microtubo de 1,07 mm de diâmetro interno, o qual, varia o comprimento visando fornecer a vazão nominal uniforme de 30 L h^{-1} . As características hidráulicas deste emissor foram previamente determinadas em laboratório. Para avaliar o desempenho do emissor, foram instaladas no campo duas linhas laterais dimensionadas através do método trecho a trecho, com declividades diferentes (0,5 % e 2,3 %). Cada lateral tinha o mesmo diâmetro, emissores igualmente espaçados e mesma vazão nominal de emissores. Ambas laterais foram dimensionadas para operar com pressão no início de 268 kPa. Os resultados mostraram que a pressão e a vazão medidas se correlacionaram muito bem com os valores previstos. A uniformidade de vazão ao longo da lateral foi classificada como excelente em ambas as situações de declive. Foi realizada uma análise de sensibilidade, para estimar as implicações dos erros ou das mudanças nas variáveis, envolvidas no dimensionamento, no desempenho hidráulico do sistema. Esta análise mostrou que o desempenho do emissor é bastante sensível a variações no diâmetro do microtubo.

Palavras-chave: Trecho a trecho; Variação de pressão; Linha lateral; Topografia

Abstract

UNIFORMITY EVALUATION FOR A MICRO-SPRINKLER IRRIGATION SYSTEM WITH MICROTUBE EMITTERS

The uniformity of applications from a micro-irrigation system is strongly affected by hydraulic design. The hydraulic variation of emitter flow is caused by pressure differences caused by the energy losses due to friction and by the field slopes. This chapter presents the hydraulic performance of a new micro-sprinkler system that uses microtube as the emitter whose length is variable to delivery uniform emitter discharges (30 Lh^{-1}). The hydraulic characteristics of this emitter were determined previously in a laboratory study. Two experimental lateral lines were designed by the step-by-step (SBS) procedure for field slopes of 0.5 % and 2.3 %. Each lateral had the same inside diameter, emitter spacing and nominal emitter discharge. Both laterals were

operated to deliver the required flow rate at the designated inlet pressure (268 kPa). The results showed that the measured pressure and discharge correlated well with the design values. The discharge uniformity along both laterals was classified as excellent (uniformity coefficients over 95%). A sensitivity analysis to estimate the implications of errors or changes in key variables on the hydraulic performance of this system showed that the emitter performance is particularly sensitive to the emitter diameter variations.

Keywords: Step-by-step; Pressure variation; Lateral line; Topography

6.1 Introdução

A irrigação localizada tem um grande potencial para reduzir o escoamento superficial e o consumo de água, no entanto, sua avaliação é fundamental tanto na fase de instalação como posteriormente e periodicamente, pois desta forma, pode-se minimizar perdas de água, energia e fertilizantes. Um sistema de irrigação eficiente é aquele que irriga uniformemente, ou seja, a vazão de cada emissor é a mesma e está de acordo com o requerimento da cultura (WU; GITLIN, 1973). Além disso, o sistema deve aplicar água uniformemente até certa profundidade do solo, proporcionando umidade necessária ao desenvolvimento normal das espécies vegetais. Para tal, é importante que a água seja aplicada evitando encharcamento e déficits na área irrigada, mesmo que seja aplicada a lâmina média requerida, poderá haver crescimento desuniforme da cultura. Para atender as necessidades hídricas das plantas localizadas em posição crítica, aumenta-se o consumo de água utilizada na irrigação da área. Desta forma, pode-se afirmar que, quanto mais uniforme for a distribuição de água de um sistema de irrigação, menores serão as lâminas aplicadas para se atingir uma máxima produção.

A quantidade de água aplicada e sua uniformidade de distribuição pelos emissores são informações importantes para o dimensionamento e manejo racional de um sistema de irrigação localizada. Conseqüentemente, esta avaliação é relevante tanto para o projetista, para confirmar se o dimensionamento foi realizado corretamente, como para o irrigante, de modo que este possa programar a irrigação, a fertirrigação e a avaliação do desempenho geral do sistema (BRALTS; KESNER, 1983). Assim, ambos precisam saber se o sistema está operando eficientemente e se a vazão desejada está sendo fornecida a cada planta. As medidas de uniformidade expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo. A performance dos sistemas

de irrigação localizada pode ser avaliada através de medidas da pressão de serviço, vazão e uniformidade de aplicação de água.

Segundo Bralts e Kesner (1983), para se determinar a uniformidade de distribuição de água no campo, pode-se medir a vazão dos emissores através do método volumétrico. Portanto, se fixa um tempo necessário para encher um recipiente de água com volume conhecido. No entanto, este procedimento pode incorrer em erros de leitura por parte do operador, por isso, normalmente prefere-se medir a vazão através de pesagem, desde que, se corrija o peso específico da água em função da temperatura.

A uniformidade de aplicação de água está diretamente relacionada à pressão em cada ponto de emissão. A distribuição de pressão ao longo da linha lateral é afetada pela perda de carga na linha, seja devido à fricção e/ou a declividade do terreno. O atrito provoca redução da pressão e conseqüentemente redução da vazão. Caso a energia de velocidade na lateral e sua variação forem negligenciadas, a variação da pressão simplesmente será uma relação linear entre perda de carga por fricção e ganho ou perda de energia devido à elevação do terreno.

No dimensionamento dos primeiros sistemas de irrigação localizada, o cálculo manual do gradiente de pressão, ao longo da linha lateral, era extremamente trabalhoso. Este fato estimulou o desenvolvimento de vários métodos simplificados, como por exemplo, os recentemente publicados por Vallesquino e Luque-Escamilla (2001) e Provenzano, Pumo e Dio (2005). Com os atuais recursos computacionais, cálculos complexos e rigorosos podem ser rapidamente efetuados, portanto, linhas laterais com centenas de emissores são rapidamente dimensionadas com elevada precisão. Em todo caso, a precisão na avaliação da perda de carga por fricção na linha lateral, é essencial para um correto dimensionamento de um sistema de irrigação (PROVENZANO; PUMO; DIO, 2005).

O método chamado de trecho a trecho, permite elevada precisão no cálculo da pressão e vazão ao longo da linha lateral. Normalmente, de acordo com este método, o cálculo inicia-se do final da linha para o início, calculando a perda de carga a cada dois emissores adjacentes, desde que a vazão, no segmento da linha lateral em questão, seja conhecida (HATHOOT; AL-AMOUD; MOHAMMAD, 1993). Apesar de o método trecho a trecho ser realizado usualmente apenas para uma linha lateral, este método pode ser incorporado em uma subunidade de irrigação ou juntamente com outros métodos, ser utilizado para analisar ou dimensionar sistemas complexos que envolvem muitas laterais. No entanto, o método trecho a trecho é, obviamente,

considerado o melhor quando se necessita conhecer com precisão a pressão ou a vazão de cada emissor na linha lateral.

Uma maneira de se obter vazão uniforme, na linha lateral, é compensando as diferentes pressões ao longo da linha. Kenworthy (1972) propôs ajustar o comprimento do microtubo para obter vazão uniforme. De modo semelhante, Wu e Gitlin (1973) obtiveram vazões uniformes usando microtubos com diferentes diâmetros, diferentes comprimentos ou uma combinação dos dois, além de usar também diferentes espaçamentos entre emissores. No entanto, em ambos os estudos, era necessário um conhecimento detalhado da distribuição de pressão ao longo da linha lateral, bem como, das características hidráulicas dos microtubos. Tibau (1976) afirma que o uso de microtubos permite, em situação de aclave ou declive, compensar a perda de carga variando o comprimento dos microtubos uma vez que, sua vazão é proporcional ao seu comprimento.

Outro aspecto a ser determinado, é o limite de variação de pressão permitido na linha lateral e conseqüentemente a variação de vazão, pois este consiste em um importante critério para dimensionamento de linhas laterais da irrigação localizada. Este critério define o comprimento da linha lateral, como também, o comprimento e diâmetros dos microtubos.

Dados do desempenho de microtubos são escassos. Um exemplo recente é o do estudo desenvolvido por Bhatnagar, Srivastava e Bhatnagar (1998) que obteve uma baixa uniformidade de emissão, 64 a 72 % com o gotejador sobre a linha sob pressão de 4 a 6,5 mca. Posteriormente, estes emissores foram substituídos por microtubos, com 1,0 mm de diâmetro interno, o que elevou a uniformidade de emissão para 94 a 98 % para as mesmas condições de pressão.

Em síntese, pode-se afirmar que a aplicação uniforme de água na linha da cultura com irrigação localizada, depende principalmente do dimensionamento do sistema que compense as variações de pressão ao longo da lateral (BUCKS; MYERS, 1973), como também, das boas características hidráulicas dos emissores (SOLOMON, 1979). Sistemas bem dimensionados e uniformes na distribuição de água aplicada são fundamentais para a técnica de irrigação e quimigação, o que resulta em aumento de produtividade (SILVA; SILVA, 2005).

Diante do exposto, o objetivo desta etapa da pesquisa foi avaliar o desempenho do microaspersor com microtubo através de coeficientes de uniformidade utilizados na irrigação localizada.

6.2 Material e Métodos

Este experimento foi conduzido na área experimental do Departamento de Engenharia Rural no campus da ESALQ/USP, em Piracicaba - SP. O experimento foi dividido em duas etapas, sendo a primeira a realização do levantamento topográfico das áreas onde seriam instaladas as linhas experimentais e a segunda a instalação de uma linha lateral em duas declividades diferentes.

A água utilizada no experimento foi suprida pelo sistema de abastecimento de água do SEMAE/SP. Duas linhas laterais foram instaladas, individualmente, em declividades uniformes de 0,5 % e 2,3 %, respectivamente, de acordo com o levantamento topográfico anteriormente realizado. A tubulação utilizada foi de polietileno com diâmetro interno real de 13,4 mm, determinado indiretamente através da medida do volume em laboratório, conforme descrito no capítulo 3. Ambos os ensaios experimentais, foram dimensionados com espaçamento entre emissores de 2 m, inclusive entre o início da lateral e o primeiro emissor. A viscosidade cinemática da água foi considerada igual a $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

As duas linhas laterais foram dimensionadas, instaladas e avaliadas. O dimensionamento foi realizado através do método trecho a trecho o qual, consiste no dimensionamento de cada linha lateral individualmente, respeitando as diferentes características hidráulicas. Este método estima a pressão em cada ponto de emissão, baseado na declividade do terreno e na perda de carga de cada trecho entre pares de emissores consecutivos e determina o comprimento máximo da linha lateral respeitando os limites da pressão mínima e máxima estabelecidos nos ensaios de laboratório, 134 e 268 kPa. Conseqüentemente, tem-se que a máxima perda de carga permitida na linha lateral foi limitada a 134 kPa.

A perda de carga de cada segmento da linha lateral foi calculada através da equação de Darcy-Weisbach, com fator de atrito calculado em função do número de Reynolds (Re). Nos trechos onde o regime de escoamento foi classificado como laminar, utilizou-se a eq. (16) e, nas demais situações, a equação de Blasius foi utilizada. A zona de transição pode ter regime laminar ou turbulento, mas em geral, ao se reduzir o fluxo em uma linha lateral acredita-se que o fluxo permaneça turbulento até atingir $Re = 2000$ (HATHOOT; AL-AMOUD; MOHAMMAD, 1993; VALLESQUINO; LUQUE-ESCAMILLA, 2001; KANG; NISHIYAMA, 1996; JAIN; SINGH; SINGH, 2002). Neste estudo foram identificados apenas três segmentos com $2000 < Re < 4000$,

quando a linha foi instalada no terreno com 0,5 % de declividade e, apenas um segmento com a linha instalada com 2,3 % de declividade. Este dimensionamento foi realizado em uma planilha interativa e simples de usar, elaborada no Excel, a qual, não exige profundos conhecimentos de informática para manuseá-la. Todas as etapas de cálculo efetuadas na planilha estão descritas no fluxograma apresentado na Figura 17. A perda de carga causada pela conexão emissor-lateral é computada como perda de carga localizada (BAGARELLO et al., 1997). No entanto, a magnitude desta perda é relativamente pequena, por isso, neste estudo, esta perda não foi considerada, bem como a energia de velocidade na lateral.

No cabeçal de controle continha um reservatório de 500 L, uma bomba KSB C 1000 N, instalada para fornecer a pressão necessária para o funcionamento da linha de irrigação e um filtro de disco, a fim de evitar entupimentos em virtude do pequeno diâmetro interno do emissor.

O emissor do microaspersor utilizado neste ensaio consistiu de um microtubo de comprimento variável em função da perda de carga na linha lateral e desnível no terreno. O microtubo possuía 1,07 mm de diâmetro interno, vazão nominal de 30 L h^{-1} e seu comprimento foi determinado de acordo com a equação pressão-comprimento apresentada no capítulo 4 (item 4.3.3). Portanto, o comprimento variou em cada ponto, ao longo da linha lateral, visando fornecer vazão nominal uniforme.

O microaspersor com microtubo proposto nesta pesquisa, em sua versão final de campo, é apresentado na Figura 18. Os microtubos foram conectados a um tubo extensor de 50 cm de comprimento e 3,8 mm de diâmetro interno, que por sua vez foi conectado à linha lateral com um conector conforme Figura 18, peça 1.7. A peça que faz a união entre o microtubo e o tubo extensor, consistiu de um cubo de 10 x 15 mm em PVC, furado de ambos os lados com brocas de diâmetros equivalentes aos tubos que seriam conectados (Figura 18, peça 1.5). Na extremidade superior do microtubo foi inserido o defletor proposto no capítulo 5. Não foram verificados vazamentos durante os ensaios de campo. No levantamento das vazões, os emissores foram numerados em ordem crescente do início para o fim da linha lateral.

Figura 17 - Fluxograma para dimensionamento da Linha Lateral através do método trecho a trecho

Figura 18 - Esquema final do microaspersor no campo. 1.1 – microtubo; 1.2 – defletor; 1.3 – linha lateral; 1.4 – tubo extensor; 1.5 – conector de PVC; 1.6 – estaca; 1.7 – conector

Para coleta da vazão, o microaspersor foi desconectado da haste de fixação ao solo e inserido dentro de um recipiente plástico com capacidade de 3 L, de forma que não houvesse respingos fora do mesmo (Figura 19). Estes recipientes foram previamente numerados e pesados. O tempo de coleta da vazão foi de aproximadamente 3 min, controlado por um cronômetro digital, com precisão de centésimos de segundo, sendo que no experimento consideraram-se apenas minutos e segundos. Foram feitas três repetições na coleta das vazões de cada emissor.

Figura 19 - Coleta de vazão no campo. 13a - Procedimentos prévios ao início da coleta, distribuição dos recipientes ao longo da linha lateral; 13b e 13c - emissor desconectado da haste de fixação e início da coleta; 13d - detalhe do procedimento da coleta

A carga de pressão no início da linha foi ajustada para a máxima, definida em função dos ensaios de laboratório (268 kPa). Tanto a pressão no início como final da linha, foram monitoradas por manômetros digitais, com precisão de 1 kPa instalados em cada extremidade e as leituras foram efetuadas no início e no final de cada coleta. Durante os ensaios o final da linha lateral foi fechado.

A temperatura da água foi outro parâmetro monitorado, visando corrigir o peso específico da água. Visualmente não foram verificados entupimentos nos emissores. As coletas de vazão foram feitas em todos emissores ao longo da linha lateral. Após o término do tempo de coleta,

procedeu-se a pesagem da água em balança digital, com precisão de 0,01 g, instalada próxima à linha lateral.

Para avaliar a uniformidade de aplicação da água, foram utilizadas medidas de dispersão para comparar com os valores médios da vazão nas laterais. Assim, os dados foram analisados de acordo com os coeficientes de uniformidade da irrigação localizada, uniformidade estatística e de emissão. Como mencionado no item 2.6, ambos são predominantemente utilizados para avaliar os sistemas de irrigação localizada em campo.

Uma simulação de dimensionamento foi realizada com o comprimento de microtubo constante ao longo da linha lateral. O comprimento adotado de 10,6 cm foi aquele equivalente ao valor médio entre os presentes na Tabela 7 (item 4.3.1), para o microtubo de 1,07 mm de diâmetro. Esta análise foi realizada com o objetivo de avaliar a implicação da variação do comprimento do microtubo na uniformidade de vazão na lateral.

6.3 Resultados e Discussão

A variação dos comprimentos dos microtubos, nas linhas laterais de irrigação avaliadas neste estudo, é apresentada na Figura 20. O dimensionamento da linha lateral pelo método trecho a trecho resultou num comprimento máximo de cada linha de 76 m (38 emissores) e 80 m (40 emissores), para as declividades de 0,5 % e 2,3 %, respectivamente.

Os perfis de distribuição de pressão em ambas as linhas laterais, estão apresentados na Figura 21. A observação visual classifica-os como perfis tipo IIa, de acordo com Gillespie, Phillips e Wu (1979). Neste tipo de perfil, a pressão no final da linha é menor que no início, mas, a pressão mínima ocorre em algum ponto entre o meio e o final da linha. Este fato deve-se ao ganho de energia, que ocorre próximo ao final da linha lateral, devido à declividade do terreno, ser maior que a perda de carga por fricção.

Figura 20 - Variação do comprimento dos microtubos ao longo das linhas laterais

Figura 21 - Perfis de pressão estimada ao longo das linhas laterais

Os valores das pressões medidas no início e no final das linhas são apresentados na Tabela 9, juntamente com os respectivos valores estimados. Os valores estimados e observados, da linha lateral instalada a 0,5 % de declividade, foram semelhantes. No entanto, para a linha instalada a 2,3 % de declividade, a pressão medida no final foi menor que a estimada em 16,8 kPa. Isto indica que, o modelo empírico para dimensionamento do sistema, em declives um pouco mais acentuados, está subestimando a perda de carga ao longo da linha.

Tabela 9 - Valores da pressão estimados e observados no início e final das linhas laterais

Declividade	Pressão estimada		Pressão medida	
	início	final	início	final
— % —	————— kPa —————			
0,5	268	134	269,2	135,8
2,3	268	134	268,2	117,2

A Figura 22 apresenta os valores médios das vazões coletadas em todos os emissores ao longo das linhas laterais. Observa-se claramente neste gráfico que, a vazão não teve grandes variações em comparação com aquela previamente estabelecida como nominal para este microtubo (30 L h^{-1}). As vazões dos emissores variaram de $28,2$ a $31,8 \text{ L h}^{-1}$, na lateral com 0,5 % de declividade e para 2,3 % de declividade a variação foi entre $28,9$ e $31,6 \text{ L h}^{-1}$. A variação aleatória evidente nas medidas da vazão, provavelmente resulta de pequenas variações na rugosidade e diâmetro dos microtubos.

Na simulação para o sistema de irrigação com tamanho de microtubo constante, os valores da vazão diminuíram com a redução da carga de pressão ao longo da linha, para ambas as declividades (Figura 23) e para um mesmo número de emissores ensaiados em campo. Esta diminuição está associada ao aumento da perda de carga por fricção ao longo da lateral. A amplitude dessa variação foi de 24 a 33 L h^{-1} , para ambas as laterais, portanto, maior quando comparanda com a situação experimental dimensionada com tamanho variável de microtubos.

Figura 22 - Vazão média coletada nas linhas laterais experimentais, com comprimento variável de microtubos, em declividades de 0,5 % e 2,3 %

Figura 23 - Simulação da vazão com comprimento do microtubo constante, em duas laterais com declividades de 0,5 % e 2,3 %

A uniformidade da vazão das duas laterais, representada por coeficientes de uniformidade está na Tabela 10. De acordo com o critério de classificação proposto por Bralts (1986) (Tabelas 1 e 2) a uniformidade ao longo das duas laterais é classificada como excelente, para ambos os coeficientes de avaliação utilizados. Este resultado confirma o comportamento observado visualmente na Figura 22. Conseqüentemente, pode-se afirmar que o funcionamento dos microaspersores com microtubos é hidraulicamente viável e que, nas condições testadas estão otimizados, proporcionando maior economia de água e melhor utilização da água pelas plantas.

Ao se utilizar comprimento de microtubo constante, a variabilidade maior nos valores de vazão resultou em valores dos coeficientes de uniformidade inferiores ao primeiro cenário, além do conseqüente aumento do coeficiente de variação (Tabela 10). Este resultado já era esperado, uma vez que, neste tipo de dimensionamento não há compensação da variação de pressão ao longo da linha lateral.

Tabela 10 - Vazão média dos emissores (VME), coeficiente de variação da vazão (CVq), Uniformidade estatística (Us) e Uniformidade de Emissão (UE)

Declividade	Comprimento	VME	CVq	Us	UE
—%—		L h ⁻¹		%	
0,5	Variável	29,8	2,9	97,1	96,4
	Constante	26	10,9	88,9	89,9
2,3	Variável	28,9	3,5	96,5	95,9
	Constante	26	11,5	88,3	90

6.4 Limitações das equações empíricas

Embora um rigoroso processo de dimensionamento tenha sido usado para as duas laterais avaliadas neste estudo, as medidas da pressão e da vazão mostraram um pequeno desvio em relação ao projetado. Este fato sugere uma incerteza no dimensionamento empírico que, diante da sua pequena magnitude encontrada nos resultados experimentais, tem importância secundária e não compromete o modelo proposto, o qual se aproxima muito da realidade.

No dimensionamento da linha lateral, dois termos da equação de energia foram ignorados. O primeiro deles é a energia de velocidade, a qual é tradicionalmente desconsiderada no dimensionamento de sistemas de irrigação localizada, devido seus pequenos valores. Nas condições experimentais estudadas, a energia de velocidade no início da lateral foi em torno de 0,28 m, obviamente muito pequena quando se compara com a perda de carga por fricção (15 m). No entanto, o valor da energia de velocidade encontrado não é tão insignificante ao compará-lo ao valor do desnível do terreno, 0,38 m e 0,4 m para as linhas laterais instaladas a 0,5 % e 2,3 %, respectivamente.

O antagonismo existente entre a energia de velocidade na linha lateral e a perda de carga localizada, devido à conexão do microaspersor na linha de irrigação, possibilita pressupor que houve, neste estudo, uma compensação de parte desta perda, a qual foi em torno de 1,0 m de comprimento equivalente nas linhas laterais.

Os trabalhos de pesquisa que estudam o fator de atrito (f) para tubos de pequenos diâmetros, utilizados na irrigação localizada, estão, em geral, divididos em dois grupos: o primeiro sugere a aplicação da equação para tubos lisos ou da equação de Blasius, como por exemplo, Khatri et al. (1979) e Bernuth e Wilson (1989); o segundo, é composto por aqueles que propõem valores até 10 % menores para o numerador da equação de Blasius, como por exemplo, Bagarello et al. (1995) e Cardoso et al. (2008).

No sistema em questão, pode-se especular que há uma possível compensação de parte da perda de carga localizada, devido a natureza hidráulica do sistema relacionada aos valores subestimados do fator de atrito (calculado por Blasius). Deste modo, os valores de pressão e de vazão ao longo da linha lateral estariam superestimados. Conseqüentemente, a vazão obtida nos ensaios de campo seria menor que a nominal e por sua vez, os valores das perdas de carga por fricção e os valores de pressão no campo não seriam tão diferentes dos valores previstos.

Outro ponto a ser considerado é a equação característica dos emissores (eq. 23), a qual foi desenvolvida empiricamente para dois determinados diâmetros de microtubo. Neste caso, trata-se de uma equação de perda de carga por fricção ao longo do microtubo, juntamente com algumas perdas de carga localizadas dos outros componentes do conjunto completo do microaspersor (conectores, por exemplo).

A aplicação da equação de energia no microaspersor com microtubo resulta em uma equação alternativa semi-empírica para seu dimensionamento, que pode ser usada para estimar a

sensibilidade do desempenho do emissor, em relação as variáveis relevantes no dimensionamento do sistema (Tabela 11). Esta análise avaliou a implicação das mudanças nos valores do comprimento e pressão de operação do microaspersor, no dimensionamento do sistema proposto, decorrentes de pequenas diferenças nos valores das variáveis: diâmetro do microtubo; fator de fricção; vazão do emissor e carga de pressão na lateral. Os resultados indicam que o desempenho do emissor é especialmente sensível ao valor do diâmetro do microtubo. Pequenas variações ou erros nos valores do diâmetro interno (1 %) implicam em grandes mudanças no comprimento (6,8 %) e na pressão de operação do microaspersor (4,1 %) para uma dada vazão.

Tabela 11 - Análise de sensibilidade para o microaspersor com microtubo de 1,07 mm de diâmetro

Variável	Mudanças nas variáveis	Mudança no comprimento do microtubo	Mudança na pressão de operação
		%	
Diâmetro do microtubo	+1	6,8	-4,1
Fator de fricção	-10	11,1	-7,6
Vazão do emissor	+10	-24,6	18,7
Pressão na lateral (H)	+10	15,3	-

6.5 Conclusões

Testes piloto em campo mostraram vazões muito próximas à nominal, ao longo da linha lateral, para ambas as declividades avaliadas, indicando que este sistema se aplica a diferentes situações topográficas.

O uso de microtubos como emissores do microaspersor, compensando a perda de carga e o desnível com a variação em seu comprimento, apresentou uniformidade da vazão ao longo da lateral, excelente, embora certa variação aleatória tenha sido observada.

O método de dimensionamento trecho a trecho para dimensionamento da linha lateral e a equação empírica do emissor, proporcionaram elevada precisão no cálculo do comprimento dos microtubos para cada microaspersor.

O sistema compensa eficientemente a variação de pressão na lateral resultando em vazão desejada e uniforme em todos os emissores.

O diâmetro interno do microtubo deve ser determinado com precisão para otimização do desempenho do microaspersor proposto.

O uso de microtubos de mesmo comprimento não se mostrou adequado para uso no sistema de irrigação proposto.

Referências

- BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow-resistance law for small-diameter plastic pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 121, n. 5, p. 313-316, Sept./Oct. 1995.
- BAGARELLO, 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, Jan./Feb. 1997.
- BERNUTH, R.D. von; WILSON, T. Friction factors for small diameter plastic pipes. **Journal Hydraulic Engineer**, New York, v. 115, n. 2, p. 183-192, Feb. 1989.
- BHATNAGAR, P.R.; SRIVASTAVA, R.C.; BHATNAGAR, V.K. Gravity fed irrigation system for cauliflower production in mid-hills of Himalayas. In: NATIONAL SEMINAR ON MICRO-IRRIGATION RESEARCH IN INDIA: STATUS AND PERSPECTIVES FOR 21ST CENTURY, 1., 1998, Bhubaneswar. **Proceedings...** Bhubaneswar: WTCER, 1998. p. 115-121.
- BRALTS, V.F. Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. (Ed.). **Trickle of irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986. chap. 3, p. 216-240.
- BRALTS, V.F.; KESNER, C.D. Drip irrigation field uniformity estimation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, p. 1369-1374, Sept./Oct. 1983.
- BUCKS, D.A.; MYERS, L.E. Trickle of irrigation: application uniformity from simple emitter. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 16, n. 6, p. 1108-1111, Nov./Dec. 1973.
- CARDOSO, G.G.G.; FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum – Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 3, p. 299-305, jun. 2008.
- GILLESPIE, V.A.; PHILLIPS, A.L.; WU, I.P. Drip irrigation design equations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 105, n. IR3, p. 247-257, Sept. 1979.

HATHOOT, H.M.; AL-AMOUD, 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, Sept./Oct. 1993.

JAIN, S.K.; SINGH, K.K.; SINGH, R.P. Microirrigation lateral design using lateral discharge equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 2, p. 125-128, Mar./Apr. 2002.

KANG, Y.; NISHIYAMA, S. Design of irrigation submain units. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 2, p. 83-89, Mar./Apr. 1996.

KHATRI, K.C.; WU, I.; GITLIN, H.M.; PHILLIPS, A. Hydraulics of microtube emitters. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 105, n. IR2, p. 167-173, June 1979.

KENWORTHY, A.L. **Trickle irrigation: the concept and guideline for use**. Michigan: Michigan State University, 1972. 20 p. (Research Report, 165).

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

SILVA, C.A.; SILVA, C.J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, ano 4, n. 8, 2005. Disponível em: <<http://www.revista.inf.br/agro/artigos/artigo08.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2006.

SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 22, n. 5, p. 1034-1038, Sept./Oct. 1979.

TIBAU, A.O. **Técnicas modernas de irrigação: aspersão, derramamento, gotejamento**. São Paulo: Nobel, 1976. 225 p.

VALLESQUINO, P.; LUQUE-ESCAMILLA, L. New algorithm for hydraulic calculation in irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 127, n. 4, p. 254-260, July/Aug. 2001.

WU, I.P.; GITLIN, H.M. Hydraulics and uniformity for drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 99, n. IR3, p. 157-168, June 1973.

ANEXOS

ANEXO A - Deduções e simplificações para obter a equação que calcula o diâmetro interno dos microtubos, de acordo com a metodologia hidrodinâmica (eq. 18)

$$\begin{aligned}
 \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_1 &= \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + hf \\
 hf &= z_1 - \frac{V_2^2}{2g} \\
 hf &= z_1 - \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2 \frac{1}{2g} \\
 hf &= z_1 - \frac{16Q^2}{2g\pi^2 D^4} \\
 hf &= z_1 - \frac{0,08262647Q^2}{D^4}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 hf &= f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \\
 hf &= \frac{64}{NR} \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \\
 hf &= \frac{64\nu}{VD} \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \\
 hf &= \frac{64\nu L}{D^2} \frac{V}{2g} \\
 hf &= \frac{64\nu L}{D^2 2g} \frac{4Q}{\pi D^2} \\
 hf &= \frac{4,153269\nu L Q}{D^4}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Substituindo 1 em 2, temos:

$$\begin{aligned}
 z_1 - \frac{0,08262647Q^2}{D^4} &= \frac{4,153269\nu L Q}{D^4} \\
 D^4 z_1 - 0,08262647Q^2 &= 4,153269\nu L Q \\
 D^4 z_1 &= 0,08262647Q^2 + 4,153269\nu L Q \\
 D^4 &= \frac{0,08262647Q^2 + 4,153269\nu L Q}{z_1} \\
 D &= \left(\frac{0,08262647Q^2 + 4,153269\nu L Q}{z_1} \right)^{0,25}
 \end{aligned}$$

ANEXO B - Descrição da metodologia proposta para obtenção da equação empírica que relaciona comprimento-pressão

A fim de apresentar de uma maneira simplificada do procedimento realizado neste estudo, elaborou-se o seguinte passo a passo.

1. Determinar o diâmetro pelo método hidrodinâmico, com o microtubo a ser utilizado como emissor, com um comprimento definido;
2. Com diâmetro encontrado hidrodinamicamente, calcular a vazão a partir da velocidade fixada em 10 m s^{-1} ;
3. Se necessário, fazer o arredondamento da vazão para ter números inteiros, podendo ser valores próximos e calcular a velocidade em função da vazão arredondada;
4. Calcular a perda de carga no cabo extensor, que deve ter diâmetro interno e comprimento fixos;
5. Estabelecer a faixa de pressão de operação do microaspersor;
6. Selecionada a maior e menor pressão, retirar desta a perda de carga no cabo extensor e a energia de velocidade, obtendo assim, a perda de carga máxima e mínima ($H_{f_{\text{total}}}$);
7. Conhecidos $H_{f_{\text{total}}}$ máxima e mínima do microtubo (passo 6); vazão e velocidade corrigida (passo 3), calcular pela equação de Darcy-Weisbach, com o f calculado por Blasius, os comprimentos para menor e maior pressão;
8. Acrescentar 10 % no valor do comprimento máximo e reduzir do valor do comprimento mínimo 10 %, logo se pode calcular o valor do ΔL $\left(\Delta L = \frac{L_{\text{máx}} - L_{\text{mín}}}{6} \right)$;
9. Subtrai-se do valor do comprimento máximo um ΔL , para se obter o próximo comprimento do microtubo e assim, sucessivamente até o sétimo tamanho do microtubo, ou seja, estar no tamanho do novo $L_{\text{mín}}$;
10. Calcular a pressão de serviço para cada comprimento, através da equação Darcy-Weisbach, com o f calculado por Blasius, acrescentando a perda de carga no cabo extensor (Passo 4) e a energia de velocidade;
11. Estabelecer três pressões para cada comprimento, sendo uma a pressão de serviço (passo 10), outra inferior e outra superior a esta ($\pm 30 \text{ kPa}$), para cada comprimento;

12. Na bancada de ensaios no laboratório, o microtubo deve está conectado à linha lateral à semelhança do que será utilizado no campo, ou seja, com o cabo extensor e conectores, incorporando assim nos ensaios a perda de carga localizada causada pela inserção do emissor na linha lateral e pela contração entre o cabo extensor e o microtubo;
13. Obter no ensaio três pares de valores pressão-vazão, para cada tamanho de microtubo, após cada leitura calcular a vazão obtida, pois se espera que as vazões determinadas no ensaio cubram a vazão nominal. Caso isto não ocorra, deve-se variar a pressão até que haja cobertura da vazão nominal estipulada no passo 3;
14. Com os três pares de valores para cada comprimento, estabelecer a equação pressão em função da vazão ($P = aQ^b$) e substitui a vazão nominal (passo 3) nesta equação, para encontrar a pressão de serviço correspondente à cada tamanho de microtubo;
15. Com os sete pares de valores de pressão de serviço e comprimento (passo 14), ajustar uma função linear que determine o comprimento (L) em função da pressão ($L = aP - b$) por análise de regressão;
16. Utilizar a função $L = aP - b$ nos projetos de dimensionamento do sistema de irrigação por microaspersão com microtubos, onde P corresponderá à pressão no ponto de inserção do emissor na linha lateral.

ANEXO C - Descrição da metodologia para obtenção da equação teórica que relaciona comprimento-pressão

A determinação dos parâmetros hidráulicos de funcionamento do microaspersor, com qualquer microtubo disponível, está descrita a seguir:

1. Determine o diâmetro real do microtubo, através da medida de fluxo, e aplique os dados obtidos neste ensaio na eq. (18). Utilize um comprimento de microtubo de aproximadamente 3 m e um desnível em torno de 1,5 m. Maiores detalhes desta metodologia estão disponíveis no Capítulo 3.
2. De posse do valor do diâmetro interno real do microtubo e considerando, por exemplo, uma velocidade de escoamento de 10 m/s, calcule a vazão do microtubo emissor.
3. Calcule a perda de carga “J” através da equação abaixo:

$$J = 0,08262 f \frac{Q^2}{D^5}$$

onde: Q é a vazão calculada para o microtubo emissor (m³/s); D é o diâmetro interno do microtubo (m); f é o fator de atrito determinado através da equação de Blasius (eq. 3).

4. Estabeleça, no mínimo, cinco pares de pressão e comprimento para o microtubo de acordo com a seguinte equação:

$$L = \frac{\left(P - \frac{V^2}{2g} \right)}{J} \cdot 100$$

onde: L é o comprimento do microtubo (cm); P é a pressão de funcionamento do emissor (mca).

5. Faça uma análise de regressão entre os pares de Pressão (P) e Comprimento (L) encontrados no item 4 e ajuste uma equação linear para guiar o dimensionamento do sistema, de acordo com o modelo proposto (eq. 23).