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

**Desenvolvimento de um sistema de irrigação por microaspersão com
microtubos para hortas agrícolas**

Alexsandro Claudio dos Santos Almeida

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

**Piracicaba
2008**

Alexsandro Claudio dos Santos Almeida
Engenheiro Agrônomo

Desenvolvimento de um sistema de irrigação por microaspersão com microtubos para hortas agrícolas

Orientador:
Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

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

**Piracicaba
2008**

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

Almeida, Alessandro Claudio dos Santos

Desenvolvimento de um sistema de irrigação por microaspersão com microtubos para hortas agrícolas / Alessandro Claudio dos Santos Almeida. - - Piracicaba, 2008.
88 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Hortas 2. Inovações tecnológicas 3. Irrigação por microaspersão 4. Microtubos I. Títulc

CDD 635

A447d

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

DEDICATÓRIA

A

DEUS

Pelas benções concedidas na minha vida.

A Minha mãe, Maria do Socorro de Almeida, e Meu pai, Juares Claudio dos Santos, “*in memória*”, exemplos de amor e dedicação, que me mostraram desde cedo o valor da ética e da educação, sem os quais não teria os valores que levarei por toda minha vida.

Aos meus irmãos, Allan, Alciele, Alda, fontes de inspiração, amor, carinho e apoio incondicional dados a mim em todos os momentos de minha vida.

A minha namorada, Marina, por todo apoio, companheirismo e compreensão.

“Devemos nos tornar as mudanças que desejamos ver no mundo.”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

A Deus pela fé e perseverança concedidas em todos os momentos.

Aos meus pais, Maria do Socorro e Juarez, pelos anos dedicados a minha formação e a de meus irmãos. Este trabalho é um dos resultados da decisão que tiveram em privilegiar nossa educação.

Ao Prof. Tarlei Arriel Botrel, pela sua orientação, amizade e apoio nas horas mais difíceis.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, por intermédio do Departamento de Engenharia Rural, pela formação adquirida, pela colhida e efetivo apoio concedidos.

A Prof. Ceres Duarte de Almeida (minha co-orientadora), pela amizade e contribuições no desenvolvimento do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pelos conhecimentos transmitidos e convivência.

Aos Funcionários do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ-USP, em especial ao seu Hélio e Luiz, pela ajuda prestada durante a realização do trabalho.

Ao Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CenPra), pelo apoio na construção dos protótipos pelo processo de prototipagem rápida.

Ao Laboratório de automação da UNIMEP, em especial ao Ronaldo, pelo acesso ao torno CNC.

Ao Prof. Antônio Baptista (Tonhão) pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Ao Jornalista Jacó de Barros, pela amizade e correção da língua portuguesa.

Aos amigos da pós-graduação, em especial ao Antonio Pires, Anthony, Allan, Pedro, Lucas Gomes, Lucas Velame, Marinaldo, Silvio, Ceres, Pablo, Ronaldo, Elenilson, Rafael Mingoti, Marlon, Leandro, Sérgio Weiner, Sérgio Medeiros, Robson Sousa, Marcos Rosa, Rochane, Kely, Cláudio, Valfísio, João Batista, Brivaldo, pelo convívio, amizade e os bons momentos que passamos juntos durante o curso.

Aos amigos de república e da Vila Estudantil, Aderbal, Lilian, Lindinalva, Jaqueline, Cássio, Celso, Luciélío, Wirifran, Andreza, Edjane, Michele, Deise, Julieth, Julio, Alexandre (*in memorian*), Tiago, Diogenes, Wanderley, pela amizade.

Aos meus amigos de Alagoas, em especial ao Paulo, Carlos, Tales, Brutus, Albano, Pedro, Ricardo, Mausan, Jacó, Marcos Alex, pela amizade e incentivo.

Ao CECA-UFAL, em especial aos Prof. Geraldo Veríssimo e Paulo Vanderley, por todo apoio e incentivo dado para fazer pós-graduação.

Aos meus grandes Professores Iêdo e Leonaldo, pelo exemplo de vida, ensinamentos para vida e amizade.

Aos estagiários Daniela e Ueslei do CEFET-Urutaí-GO; e a Alexandre e Enio, estagiários do GPID-ESALQ-USP, pelo apoio na avaliação experimental.

A FAPESP pela concessão da bolsa de estudos.

E a todos, que de forma direta e indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 DESENVOLVIMENTO	21
2.1 Considerações gerais sobre microaspersão	21
2.2 Inovação tecnológica na agricultura	22
2.3 Desenvolvimento de emissores	23
2.3.1 Prototipagem	24
2.3.2 Construção de emissores	26
2.3.3 Termoplásticos	28
2.4 Distribuição de água	28
2.5 Uniformidade de distribuição de água	30
2.5.1 Uniformidade de Distribuição espacial de água	30
2.5.2 Uniformidade da vazão ao longo da linha lateral	34
2.6 Comentários finais	37
2.7 Material e métodos	37
2.7.1 Materiais e equipamentos utilizados	38
2.7.2 Desenvolvimento dos anteparos de microaspersores	39
2.7.3 Ensaios	46
2.7.4 Adaptação dos microtubos aos microaspersores comerciais	48
2.7.5 Programas de software	52
2.8 Resultados e discussão	52
2.8.1 Materiais utilizados no processo de usinagem	52
2.8.2 Construção da bailarina do anteparo por moldagem	54
2.8.3 Construção do protótipo vibratório através da usinagem	54
2.8.4 Construção do protótipo giratório com bailarina em degraus	55
2.8.5 Construção do protótipo giratório com bailarina cônica com eixo metálico	55
2.8.6 Construção do protótipo giratório com bailarina cônica	56

2.8.7 Perfil pluviométrico de distribuição de água dos protótipos de microaspersores	56
2.8.8 Distribuição do percentual do volume de água	61
2.8.9 Uniformidade de distribuição espacial dos protótipos de microaspersores	64
2.8.10 Adaptação dos microtubos aos microaspersores comerciais	70
2.9 Considerações finais	75
3 CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS	79
ANEXOS	85

RESUMO

Desenvolvimento de um sistema de irrigação por microaspersão com microtubos para hortas agrícolas

A inovação tecnológica é o caminho mais viável para desenvolver uma agricultura sustentada no Brasil. Portanto, o país deve investir nos setores que possam produzir tecnologias inovadoras, adequadas as suas condições peculiares e de custo mais acessível, em substituição à dependência por produtos importados. Dentro desse contexto, este trabalho tem os objetivos de desenvolver anteparos de microaspersor com boa uniformidade de distribuição para trabalhar com sobreposição e adaptar a técnica desenvolvida por Almeida, Botrel e Smith (2008) para os microaspersores convencionais. O trabalho foi conduzido no Laboratório de Hidráulica e na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, onde foram desenvolvidos e avaliados os protótipos de microaspersores, e avaliado o desempenho da adaptação do microtubo aos microaspersores comerciais. Para o desenvolvimento dos protótipos de microaspersores foram testados diversos materiais e processos. Os materiais utilizados foram argila, gesso, biscuit, massa de modelar, pedra talco e os tarugos de PVC, technyl, teflon e polipropileno. Já os processos foram o torneamento mecânico, modelagem e a prototipagem rápida. O desempenho da adaptação dos microtubos aos microaspersores comerciais foi avaliado através de testes em laboratório e no campo. A relação comprimento de microtubo versus pressão de operação versus vazão foi determinada, em seguida, avaliou-se a uniformidade de distribuição de água na linha lateral. Utilizou-se os coeficientes de uniformidade de Christiansen, o da uniformidade de distribuição e o da uniformidade estatística na avaliação do desempenho dos emissores. O PVC e o tecnyl foram os materiais que apresentaram mais facilidade na construção das bailarinas, porém, o PVC foi o escolhido devido ao melhor acabamento. As melhores sobreposições ocorreram com o protótipo de 6 canaletas com 35° e duas canaletas diferenciadas. Os ajustes realizados nos protótipos iniciais que não funcionaram contribuíram significativamente para que o protótipo desenvolvido alcançasse resultados positivos. A geometria das bailarinas, ângulo e número de canaletas afetaram o desempenho do modelo, sendo que, os de maiores ângulos apresentaram uniformidade de distribuição de água mais satisfatórias. A utilização da técnica de microtubos se adapta a microaspersores convencionais, uniformizando a vazão ao longo da linha lateral.

Palavras-chaves: Irrigação Localizada; Microtubos; Inovações Tecnológicas

ABSTRACT

Development of a microsprinkler system with microtubes for vegetable crops

The technology innovation is the way most feasible to develop a sustainable agriculture in Brazil. In this way, the country will have to invest in sectors which can produce innovation technologies, adequate to specific conditions and with cost more accessible, to replace the dependency from imported products. In this context, this work had to objective to develop microsprinkler spinner deflector with good distribution uniformity to work with overlap and adapt the microtubes techniques developed by Almeida, Botrel e Smith (2008) to commercial microsprinkler. Experiments in laboratory and field were carried out at Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, University of Sao Paulo, Brazil, where were developed and evaluated the microsprinkler prototypes and evaluated discharge uniformity along of lateral line with commercial micro-sprinklers and microtubes as emitter. In the development of the microsprinkler prototypes were tested a lot of materials and processes. The materials utilized were clay, biscuit, plaster, modeling mass, talc stone, PVC, technyl, teflon and polypropylene. The processes were mechanic tournament, modeling and the rapid prototyping. The performance of micro-sprinkler irrigation system with microtube emitters was evaluated both laboratory and field tests. Microtube pressure-length-discharge relationship was determinate and discharge distribution uniformity along of lateral line was evaluated. Uniformity Coefficient from Christiansen (CUC), Distribution Uniformity (DU) and Uniformity Statistic (Us) were used as indicators for evaluation of performance of emitters. Among the tested materials, the PVC and the technyl showed more facility in the deflector build, however, the PVC was choose due the better finish small channels. The rapid prototyping process provided the better finish in the deflector. In the proposed overlap, the better overlap arrangement occurred with the prototype of 6 channels with 35° and two channels differentiated. The developed prototypes which not worked and the adjustments did in them, contributed significantly to reach positive results in prototypes. The deflector geometric, angle and number of channels affected directly the performance of microsprinklers, nevertheless, the biggest angle showed water distribution uniformity more satisfactory. The utilization of microtubes techniques adapted well in conventional microsprinklers, and provided good uniformity in the discharge in lateral line.

Keywords: Microsprinkler; Microtube; Technology Innovation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de fabricação de protótipos por Prototipagem rápida por camadas	25
Figura 2 - Diagrama representativo do processo de moldagem por injeção.	27
Figura 3 - Diagrama representativo do processo de moldagem por compressão.	27
Figura 4 - Influência do ângulo de inclinação do aspersor no perfil pluviométrico.....	34
Figura 5 - Materiais utilizados.....	39
Figura 6 - Ferramentas e equipamentos utilizados na construção dos protótipos	39
Figura 7 - Seqüência da construção do protótipo vibratório pelo processo de moldagem	40
Figura 8 - Seqüência da construção do protótipo vibratório através da usinagem.	41
Figura 9 - Protótipo tipo giratório com bailarinas em degrau	43
Figura 10 - Microaspersor giratório com bailarina cônica e pino de aço.....	43
Figura 11 - Protótipos modelo bailarina com 6, 4 e 3 canaletas.....	44
Figura 12 - Dimensões da bailarina do microaspersor.....	45
Figura 13 - Malha de coletores para determinação da uniformidade dos microaspersores.	47
Figura 14 - Microaspersores adaptados com microtubo trabalhando como bocal.	48
Figura 15 - Experimento de campo com os microaspersores comerciais com microtubos.	51
Figura 16 - Perfil de distribuição de água dos protótipos de microaspersor com 3 canaletas.....	57
Figura 17 - Perfil de distribuição de água dos protótipos de microaspersor com 4 canaletas.....	59
Figura 18 - Perfil de distribuição de água dos protótipos de microaspersor com 6 canaletas.....	59
Figura 19 - Distribuição percentual dos volumes para o protótipo com 3 canaletas.	62
Figura 20 - Distribuição percentual dos volumes para o protótipo com 4 canaletas.	63
Figura 21 - Distribuição percentual dos volumes para o protótipo com 6 canaletas.	64
Figura 22 - Diagrama pluviométrico dos protótipos de 6 canaletas com 35° (3 m x 3 m).....	68
Figura 23 - Diagrama pluviométrico do protótipo de 6 canaletas com 35° e duas canaletas diferenciadas no espaçamento de 4 m x 4 m.	69
Figura 24 - Diagrama pluviométrico dos protótipos com 27° no espaçamento de 4 m x 4 m.	69
Figura 25 - Comparação entre a pressão estimada e a pressão observada para os quatro modelos de microaspersores adaptados ao microtubo.	71
Figura 26 - Gradiente de pressão estimado ao longo da linha lateral.	71
Figura 27 - Distribuição da vazão dos emissores ao longo da linha lateral.	73
Figura 28 - Diagrama Pluviométrico do microaspersor modelo B.....	75

Figura 29 - Diagrama Pluviométrico do microaspersor modelo C.....	75
Figura 30 - Diagrama Pluviométrico dos protótipos de microaspersor com 3 canaletas.....	86
Figura 31 - Diagramas Pluviométricos dos protótipos de microaspersor com 4 canaletas.....	87
Figura 32 - Diagramas Pluviométricos dos protótipos de microaspersor com 6 canaletas.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas dos materiais utilizados no torneamento das bailarinas de microaspersor.....	39
Tabela 2 - .Características operacionais dos microaspersores comerciais fornecidas pelo fabricante.	49
Tabela 3 - Valores experimentais dos parâmetros hidráulicos do sistema de irrigação por microaspersão com microtubos.....	52
Tabela 4 - CUC e CUD dos protótipos de microaspersores para diversos espaçamentos de microaspersores em m (arranjoquadrangular).....	66
Tabela 5 - Equação comprimento do microtubo versus pressão	70
Tabela 6 - Resultados experimentais das pressões, vazão e os coeficientes de uniformidade de vazão ao longo da linha lateral.....	72

1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento de grande disputa, principalmente em centros urbanos. Ao redor desses centros encontra-se um grande número de hortas agrícolas, formando os conhecidos “cinturões verdes”, os quais são responsáveis pela produção da maior parte das hortaliças e frutas consumidas nas grandes cidades.

A irrigação nessas hortas é muito intensa, e na maioria dos casos realizadas com desperdício, devido ao manejo hídrico inadequado e à utilização de sistemas de irrigação com baixa uniformidade de aplicação e distribuição de água. Em resposta à redução cada vez maior da disponibilidade de água nessas regiões e a necessidade de economizar água, agricultores têm procurado adotar sistemas de irrigação com melhor eficiência de aplicação e distribuição de água, sendo que, a microaspersão tem se apresentado como alternativa para irrigar hortaliças cultivadas em espaçamentos adensados (cenoura, folhosas, etc.), onde a adoção de sistema de gotejamento é inviável. Porém esse sistema foi inicialmente desenvolvido para irrigar fruteiras de grande porte, que geralmente apresentam sistema radicular amplo e profundo. Nesse tipo de cultura geralmente cada microaspersor irriga uma planta isoladamente, e a uniformidade de distribuição espacial de água não é um fator levado em consideração, já que o próprio solo promove a redistribuição de água no perfil do solo, e, portanto supre a necessidade hídrica da cultura, mesmo o sistema de irrigação apresentando baixas uniformidades de distribuição espacial. Com isso a maioria dos microaspersores encontrados no mercado apresenta perfil de distribuição muito irregular e em formato de sino ou exponencial cúbica. Esse formato de perfil inviabiliza irrigações com sobreposições dos jatos, pois se obtêm baixos valores de uniformidade de distribuição. Já no caso das hortaliças o sistema radicular é superficial e sofre bastante com a desuniformidade de distribuição espacial de água. Nesse sentido existe a carência de microaspersores que tenham um perfil de distribuição que permita irrigar com sobreposição dos jatos para irrigar área total, de forma a alcançar boa uniformidade de distribuição espacial para essas culturas de alto requerimento hídrico e alto retorno econômico.

Nos sistemas de irrigação por microaspersão e gotejamento, ocorrem variações na vazão ao longo da linha lateral. Essas variações ocorrem devido às de perda de energia por atrito e diferenças topográficas que causam variação na vazão. Um dos mecanismos mais utilizados para uniformizar a vazão ao longo da linha lateral tem sido o emissor autocompensante, que faz uso de

diafragmas para regular a passagem de água em cada emissor, possibilitando ao emissor apresentar uma mesma vazão sob diferentes pressões. Esse dispositivo embora eficiente, apresenta as desvantagens de encarecer o emissor e de sofrer fadiga perdendo a qualidade com o tempo de uso. Como alternativa a esse dispositivo, Almeida, Botrel e Smith (2008) desenvolveram um sistema de microaspersão com a utilização de microtubos, como mecanismo de regulação de vazão ao longo da linha lateral, conferindo altas uniformidades de vazão a um baixo custo de implantação.

Diante da necessidade de adaptar os sistemas de microaspersão para irrigar culturas que exijam boa uniformidade de vazão e distribuição, os objetivos deste trabalho foram desenvolver anteparos de microaspersor com boa uniformidade de distribuição para trabalhar com sobreposição e adaptar a técnica desenvolvida por Almeida, Botrel e Smith (2008) para os microaspersores convencionais.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Considerações gerais sobre microaspersão

O início da irrigação localizada utilizando tubos de argila perfurados enterrados data de aproximadamente 1860 a 1913, nos Estados Unidos e Alemanha. Porém só após o desenvolvimento dos plásticos durante e após a Segunda Guerra Mundial, foi que o uso de tubos plásticos na irrigação tornou-se viável, permitindo a expansão desse sistema de irrigação. Em 1950 surgiu o primeiro emissor, o microtubo espaguete, confeccionado com microtubos de polietileno com diâmetro variando de 0,5 a 1,5 mm. Inicialmente esses emissores foram utilizados em irrigação de vasos de flores em casas de vegetação. Mas logo nas próximas duas décadas, aproximadamente 250 tipos de emissores encontravam-se disponibilizados no mercado, sobretudo gotejadores (BUCKS; DAVIS, 1986).

O desenvolvimento da irrigação localizada se iniciou com a utilização de microtubos como emissor (emissor de alta perda de carga), utilizando o princípio de fazer a água percorrer um longo percurso e distribuir água em pequenas quantidades, dissipando a energia ao longo desse percurso (BUCKS; MYERS, 1973). Porém, com o desenvolvimento das indústrias esse emissor foi substituído por outros, sendo que, o princípio de percorrer um longo percurso para dissipar a energia continuou a ser utilizado na confecção dos emissores, como pode ser visto nos emissores tipo labirinto e espirais.

Um pouco mais tarde, com a adoção da tecnologia nas mais variadas culturas e tipos de solos observou-se que a adoção do sistema de gotejamento para solos mais permeáveis e frutíferas de amplo sistema radicular, limitava o crescimento da cultura em função do pequeno bulbo molhado, comprometendo o desenvolvimento e a sustentação da planta, pois em solos arenosos, a infiltração vertical é dominante em relação à infiltração horizontal. Com isso a aplicação da água de forma essencialmente pontual e em intensidade muito pequena, como no caso da irrigação por gotejamento, resulta numa pequena seção transversal e grande profundidade do volume de solo molhado. Isto aumenta o potencial para perdas de água por percolação, além de concorrer para uma aplicação de água não satisfatória em toda a zona radicular (BOMAN, 2007). Para superar esse problema, a microaspersão foi concebida com a principal característica de aplicar água, sob baixa pressão, mediante sua pulverização em pequenas gotas, resultando numa distribuição superficial molhada de forma circular ou em leque. A microaspersão também requer sistemas de

filtragem menos complexos, devido ao tamanho dos orifícios dos bocais serem maiores que os dos gotejadores (BOMAN, 2007; BOTREL, 1984; KELLER; BRIESNER, 1990; NOGUEIRA, 1989).

Embora o sistema apresente alta eficiência de aplicação, ocorre certa variação na vazão ao longo da linha lateral devido à variação de pressão que ocorre em função da perda de carga, comprometendo assim, a uniformidade do sistema e limitando o comprimento da linha lateral. Este problema não foi verificado nos sistemas de irrigação com o uso de microtubos como emissores, já que a técnica de microtubos permite, até mesmo em situação de aclive ou declive, compensar a perda de carga variando o comprimento dos microtubos, uma vez que a vazão no microtubo é inversamente proporcional ao seu comprimento (BUCKS; MYERS, 1973; SOUZA; BOTREL, 2004). Para contornar a variação de vazão na linha lateral a indústria da irrigação desenvolveu os emissores autocompensantes, emissores auto-reguláveis, onde se ajusta uma determinada vazão para todos os emissores ao longo da linha lateral. Esses emissores utilizam diafragmas para regular a vazão, os quais reduzem ou aumentam a passagem de água em função da variação da pressão na lateral. Entretanto, o custo do emissor com esse dispositivo é superior ao convencional e o diafragma pode apresentar fadiga ao longo do tempo, perdendo sua capacidade de controlar a vazão. No intuito de uniformizar a vazão ao longo da linha lateral e possibilitar a utilização de linhas laterais mais compridas, Almeida, Botrel e Smith (2008) desenvolveram o sistema de microaspersão com utilização de microtubos como mecanismo regulador de vazão, alcançando altos valores de uniformidade e com baixo custo de instalação.

2.2 Inovação tecnológica na agricultura

Na economia globalizada, a inovação é um componente vital para o sucesso dos negócios (LINO et al., 2000). As empresas rurais precisam aumentar sistematicamente o poder de competição, através da adoção de tecnologias que confirmem incrementos na produtividade agrícola de forma sustentável. Contudo, verifica-se que grande parte da tecnologia disponibilizada no mercado nacional é importada, sobretudo na irrigação, limitando a competitividade da agricultura brasileira e reduzindo a lucratividade da atividade. Para reverter essa situação, o país deve investir nos setores que possam produzir tecnologias inovadoras, adequadas as condições regionais e de custo mais acessível, em substituição a dependência por produtos importados.

Uma boa parte das empresas e instituições de pesquisa brasileiras reconhece que a inovação é fundamental para alcançar ou sustentar uma vantagem competitiva num mercado em acelerada transformação, mas é bem restrito o número delas que efetivamente trabalham pela inovação

(NICOLSKY, 2007). São poucos os programas de pós-graduação que fazem pesquisa nessa linha, deixando de lado, uma linha de pesquisa que oferece maior independência tecnológica ao país. Principalmente no setor onde o país tem a maior competitividade: a agricultura.

A inovação e o conhecimento são, hoje, os principais fatores que determinam a competitividade de setores, países e empresas. A capacitação das empresas na produção e no uso do conhecimento é fundamental na corrida para a competitividade. As etapas de invenção e inovação são interativas, e isso é percebido pelo crescente aumento das atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nas instituições responsáveis pela comercialização das inovações: as empresas. Ciência e tecnologia (C&T) não são independentes e têm envolvimento sinérgico. Deve-se entender que inovação não é algo que ocorra apenas em países avançados, em indústrias de alta tecnologia. O processo inovativo ocorre quando a empresa e ou instituição domina e implementa a produção de bens e serviços que sejam novos para ela, independente do fato de serem novos ou não para os seus concorrentes (NICOLSKY, 2007).

A inovação surge quando se acredita que os produtos e processos correntes podem ser melhorados (LINO et al., 2000). Ao analisar a disputa entre os setores por água, constata-se que a agricultura é responsável pela utilização de mais de 60%, principalmente, porque a irrigação em muitos lugares ainda é realizada de forma ineficiente. Isto obriga o setor de irrigação a investir em pesquisas que aumentem a eficiência de uso desse recurso cada vez mais escasso e disputado. Para tanto, o setor deve buscar alternativas de sistemas mais eficientes na aplicação de água.

2.3 Desenvolvimento de emissores

Para o desenvolvimento dos emissores de irrigação, os passos são projetar, prototipar, avaliar os protótipos, construir os moldes onde serão injetados as peças (emissores), construir as peças e, por fim, avaliá-las. Os materiais utilizados na injeção são os termoplásticos. Os objetos são projetados atualmente em softwares bem específicos para cada setor, sendo que os mais utilizados são o auto-cad e o solid work, que utilizam o recurso CAD (Desenho Assistido pelo Computador). Na confecção dos protótipos existem diversos tipos de processos, desde a utilização de massas de modelar, usinagem em tornos mecânicos e automáticos, e a mais recente técnica de prototipagem rápida. Depois de confeccionado, o protótipo passar por várias avaliações até a obtenção do protótipo com as características desejadas. Só então o protótipo é utilizado para fazer o molde, geralmente de ferro galvanizado, níquel ou aço, onde serão construídos os emissores através dos processos de injeção. Atualmente vários processos de construção estão disponíveis,

sendo que os mais utilizados são o processo de moldagem por injeção e moldagem por compressão.

2.3.1 Prototipagem

A criação de um protótipo é um passo fundamental para o desenvolvimento de muitos produtos. Trata-se da etapa em que todo o projeto é concretizado, por meio de um modelo que permitirá testes mais objetivos e ajustes mais preciso (MIETTI; VENDRAMETO, 2006). Durante o desenvolvimento, se faz diversos ajustes como, por exemplo, a alteração da posição de ângulos e a inclusão de componentes, que aumentarão a funcionalidade do produto. Os estágios iniciais do desenvolvimento do produto são os mais importantes, pois os gastos nesta fase são pequenos em relação às fases posteriores, o custo de mudança em um desenho é bem menor que a alteração em uma ferramenta ou em molde metálico (LINO et al, 2000). A prototipagem permite a detecção precoce de problemas, reduzindo custos e melhorando a qualidade do produto.

A prototipagem é uma prática antiga para se confeccionar protótipos, a qual se utiliza de vários processos de prototipagem, dentre eles podemos citar: modelagem com cera, argila, gesso, silicone; torneamento mecânico e automático; e a mais recente através da prototipagem rápida (RP). A prototipagem através da modelagem é um dos processos mais antigos e mais usados, porém é um dos mais demorados. Já a prototipagem por torneamento é mais voltada basicamente para construção de peças de formato geométrico menos complexo. Enquanto a prototipagem rápida é o processo mais moderno da atualidade, no qual se pode confeccionar, sendo praticamente ilimitado em termos de capacidade de geração de formas (MIETTI; VENDRAMETO, 2006).

A prototipagem rápida vem se constituindo, graças a sua integração com o CAD (desenho assistido pelo computador), em elemento de agilização no desenvolvimento de produtos, reduzindo a demora na obtenção de modelos ou protótipos nas fases de projeto conceitual, testes e atividades pré-produção (LINO et al., 2000). É uma tecnologia alternativa que vem substituindo a metodologia tradicional, facilitando a elaboração de protótipos de maneira mais precisa e rápida.

A prototipagem rápida associa a facilidade e precisão do programa CAD às máquinas de CNC (Comando Numérico Controlado), e utiliza de materiais como resinas e metal em pó, convertendo o projeto do novo produto rapidamente num protótipo físico. O protótipo obtido permite estudos diferenciados quanto à interferências, processos de fabricação, funcionalidade. A flexibilidade para promover alterações tem custo relativamente baixo pelo fato de dispensar a

elaboração de ferramental (MIETTI; VENDRAMENTO, 2006). As pesquisas têm ampliado o espectro de uso dessa tecnologia, cujas aplicações atendem desde produtos do setor de autopeças até a construção de próteses em medicina.

Figura 1 - Processos de fabricação de protótipos por Prototipagem rápida por camadas (CenPRA)

Como ilustrado na Figura 1 o conjunto de imagens bidimensionais no formato padrão internacional DICOM, relativas aos diferentes planos de cortes ou fatias do corpo, são usadas na reconstrução do volume 3D da peça de interesse através de sistemas especiais de tratamento de imagens como o InVesalius, desenvolvido e disponibilizado gratuitamente pelo CenPRA. O modelo virtual 3D é transformado para o padrão STL (formato estereolitográfico) para ser interpretado pelos equipamentos de prototipagem rápida, os quais realizam a construção do protótipo físico que reproduzirá fielmente a peça de interesse (GONI et al., 2001). Todos os processos de prototipagem rápida atualmente existentes são constituídos por cinco etapas básicas:

- Criação de um modelo CAD da peça que está sendo projetada;
- Conversão do arquivo CAD em formato STL, próprio para estereolitografia;
- Fatiamento do arquivo STL em finas camadas transversais;

- Construção física do modelo, empilhando-se uma camada sobre a outra;
- Limpeza e acabamento do protótipo.

Depois de desenvolvido o protótipo é usado para produzir um modelo positivo da peça a ser moldada. A seguir o modelo é revestido com níquel, o qual é reforçado com um material cerâmico rígido. As duas metades do molde são separadas para se remover o modelo, obtendo-se então um molde que pode produzir dezenas de milhares de peças injetadas (GONI, 2008).

2.3.2 Construção de emissores

O processo de confecção dos emissores é de suma importância para se obter um emissor com as características desejadas. Os termoplásticos são os melhores materiais para construção dos emissores, oferecendo características como flexibilidade, resistência e durabilidade. Existem diferentes tipos de termoplásticos, sendo que a escolha de cada um está em função do método de moldagem utilizado. Existem vários processos de confecção dos emissores. Para diminuir as variações no processo de fabricação dos emissores, devem-se evitar variações na pressão e temperatura da água, utilizar materiais homogêneos (VON BERNUTH; SOLOMON, 1986). Em seguida serão comentados os dois mais utilizados.

2.3.2.1 Moldagem por injeção

A moldagem por injeção é um dos processos mais utilizados na transformação de material polimérico, devido principalmente à sua elevada produtividade e possibilidade de obtenção de peças com geometria complexa (OLIVEIRA et al., 2004). Esse processo é utilizado para a confecção de diversos produtos em PVC, polietileno e polipropileno, como conexões e emissores. Uma máquina injetora é composta basicamente por um funil de alimentação, cilindro de plastificação, rosca (que é alojada dentro do cilindro) e molde (Figura 2). O composto termoplástico, geralmente em forma de grãos, é alimentado através do funil e forçado a entrar no cilindro de plastificação. O cilindro é equipado com resistências elétricas e, com o auxílio da rosca, plastifica o composto, permitindo que ele seja injetado na cavidade do molde, conferindo forma final à peça. A resina solidifica rapidamente; então o molde é aberto e as partes são removidas. A uniformidade de confecção das peças é conseguida através do controle da temperatura e da pressão (VON BERNUTH; SOLOMON, 1986). A velocidade do ciclo de

confeção é função da velocidade de esfriamento do molde e da condutividade térmica do termoplástico escolhido.

Figura 2 - Diagrama representativo do processo de moldagem por injeção

2.3.2.2 Moldagem por compressão

O processo de moldagem por compressão se assemelha um pouco com o processo de injeção, sendo que, no por compressão a pressão aplicada é maior. O termoplástico é aplicado dentro de uma cavidade do molde aquecida. Em seguida, ela é fechada e se aplica calor e pressão até o termoplástico preencher todas as partes do molde (Figura 3). Depois o molde é aberto e se remove as partes já prontas (VON BERNUTH; SOLOMON, 1986). Embora seja um processo mais rápido e mais barato que o de injeção, ele é limitado para construir peças mais complexas e com muitos detalhes (NOGUEIRA; MARLET; RESENDE, 1999), pois os moldes de peças complexas estão sujeitas a distorções, formação de rebarbas nas peças, dificuldade de extração e menor produtividade nessas condições.

Figura 3 - Diagrama representativo do processo de moldagem por compressão

Depois de confeccionado, o produto deverá passar pelos testes de qualidade recomendados pelos órgãos que normatizam sua funcionalidade. No caso, dos emissores de irrigação é o coeficiente de variação, a distribuição de água e raio molhado.

2.3.3 Termoplásticos

Os emissores estão sujeitos a extremas condições ambientais, incluindo temperaturas altas, luz, corrosão química pelos produtos aplicados na cultura e abusos físicos. Portanto, os materiais escolhidos para a sua fabricação devem ser resistentes para suportar todas essas adversidades ambientais. Os três materiais mais utilizados no processo de moldagem dos emissores são PVC (policloreto de vinila), polietileno e polipropileno, pois eles apresentam alta resistência química e se adaptam bem ao processo de injeção (VON BERNUTH; SOLOMON, 1986). O PVC é utilizado principalmente na produção de tubos através do processo de extrusão. Os polietilenos mais utilizados na construção dos emissores são o de alta densidade (PEAD) e o de baixa densidade (PEBD), sendo que este último é o mais utilizado na construção de tubos para linha lateral. Polipropileno é o de menor custo, porém apresenta a desvantagem de absorver água e de sofrer alterações em sua dimensão. Para aumentar a resistência desses materiais e diminuir a fotosensibilidade aos raios ultravioletas, comumente se utilizam fibras de vidro e radiação.

2.4 Distribuição de água

A distribuição de água em sistemas de aspersão tem sido estudada há mais tempo, enquanto que para os microaspersores as informações são em menor número e obtidas mais recentemente (CONCEIÇÃO, 2002). No geral, o perfil de distribuição de água do microaspersor varia bastante de acordo com o modelo utilizado, o que pode ser atribuído aos processos de fabricação, a geometria do emissor e as diferenças de ângulos do jato de água dos microaspersores com relação à superfície. Também se constata que na grande maioria dos perfis de distribuição, as taxas máximas de aplicação de água se situam na faixa intermediária do raio efetivo, o que caracteriza o perfil em forma de sino ou de exponencial cúbica.

Botrel (1984), ao avaliar as características hidráulicas de dois microaspersores, verificou que os raios efetivos variaram de 0,91 m a 2,6 m em função da pressão de serviço. E as intensidades de precipitação ao longo do raio variaram bastante, desde valores próximos de 1 mm h⁻¹ a 80 mm h⁻¹. Em outra pesquisa similar, Nogueira (1989) avaliou as características hidráulicas de três marcas de microaspersores nacionais, e verificou que o raio efetivo variou de 1 m a 3,8 m,

com intensidade de aplicação variando de $5,0 \text{ mm h}^{-1}$ a 80 mm h^{-1} . Em ambas as pesquisas, as maiores intensidades se situaram entre 0,5 m e 1,2 m. No geral, os autores observaram que ocorreu uma alta irregularidade nos perfis de distribuição de acordo com a marca de microaspersor.

Sampaio et al. (1996) apresentaram a distribuição de água em microaspersores NAAN 7110 operando com bailarina e difusores. Os autores observaram que os giratórios (com bailarina) proporcionaram raios de alcance três vezes maior que os obtidos com os difusores, os quais apresentaram intensidades de precipitação até vinte vezes maior do que as registradas com os rotores. Os perfis de distribuição mostraram uma maior taxa de aplicação até 1,0 m. As distribuições espaciais de água empregando-se os rotores mostraram-se mais uniformes do que as obtidas utilizando-se os difusores, que promoveram maior concentração de água próxima ao emissor.

Dantas Neto et al. (1997), avaliando o desempenho de um microaspersor em condições de campo e laboratório, verificaram, que em ambas as situações, o raio efetivo médio foi igual a 2,8 m e a taxa de aplicação média foi 2 mm h^{-1} . Por outro lado, a lâmina no campo foi ligeiramente menor, em função das perdas devidas aos fatores climáticos. As maiores taxas de aplicação (5 mm h^{-1}) se situaram entre as distâncias de 0,7 m e 1,2 m.

Boman e Parsons (1999), avaliando microaspersores difusores e giratórios, verificaram que o raio efetivo do giratório foi o dobro (2,75 m) com taxas de aplicação variando entre $1,0 \text{ mm h}^{-1}$ e $16,3 \text{ mm h}^{-1}$, sendo que o maior volume foi aplicado nas regiões mais próximas dos emissores. Os autores relatam que os microaspersores giratórios também apresentam maior uniformidade dos perfis ao longo do raio efetivo, ao passo que a distribuição dos difusores é bastante irregular.

Nascimento et al. (1999) avaliaram o perfil de distribuição do microaspersor Rain-Bird Qn-14. O perfil apresentou uma distribuição em forma de uma exponencial cúbica, concentrado os maiores valores da intensidade de aplicação entre 1,5 m e 3,0 m a partir do emissor. Matos et al. (1999), avaliando o microaspersor rotativo autocompensante Dan 2001, obtiveram raio efetivo igual a 2,25 m, apresentando uma intensidade pluvial máxima na região mais próxima do emissor, com redução gradativa a partir daí. A uma distância de 1,05 m a intensidade aumentou ligeiramente, voltando a decrescer até a extremidade correspondente ao raio molhado máximo.

Holanda Filho et al. (2001) avaliaram o microaspersor Rondon e observaram que o perfil de distribuição do microaspersor apresentou valores de precipitação próxima ao emissor, aumentando até um valor máximo de $4,0 \text{ mm h}^{-1}$ a cerca de 0,45 m e diminuindo, a partir daí. Praticamente de forma linear até uma distância máxima de 3,3 m.

O formato do perfil da maioria dos microaspersores disponíveis atualmente no mercado inviabiliza a recomendação do sistema de microaspersão para irrigações com sobreposições dos jatos, confirmando a utilização desses apenas para irrigação de plantas isoladas. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de emissores de microaspersores com perfis de formato triangular ou retangular adequado para irrigação com sobreposição dos jatos.

2.5 Uniformidade de distribuição de água

Um sistema de irrigação geralmente é dimensionado de acordo com a uniformidade de distribuição de água desejada, a qual geralmente é determinada em função do valor econômico da cultura a ser irrigada. Porém, deve-se salientar que existem dois tipos de uniformidade que devem ser consideradas. A primeira refere-se à uniformidade de distribuição espacial no campo, que está relacionada ao perfil de distribuição do emissor ao longo do seu diâmetro molhado e a necessidade de sobreposição dos jatos ou de bulbos úmidos. A segunda é a uniformidade de aplicação de água ao longo de uma linha lateral, ou seja, a uniformidade da vazão entre os emissores.

2.5.1 Uniformidade de Distribuição espacial de água

A uniformidade de distribuição é um indicador da variabilidade da lâmina de água aplicada ao longo da extensão da superfície do terreno irrigado. Essa uniformidade é muito importante para as culturas agrícolas atingirem altas produtividades, principalmente para aquelas mais sensíveis ao déficit hídrico e em condições de solos arenosos, onde a redistribuição lateral é limitada (BOMAN, 2007; CHRISTIANSEN, 1942). Excessos de aplicação de água nesses solos resultam em lâmina percolada e lixiviação de nutrientes para fora da zona radicular. Ao passo que, baixos valores de uniformidade determinam, em geral, maior consumo de água e energia, maior perda de nutrientes e estresse hídrico. Uniformidades altas são especialmente desejadas na fertirrigação, visto que, as aplicações de nutrientes serão mais uniformes. Por isso, a uniformidade é um dos fatores mais importantes no dimensionamento e na operação de sistemas de irrigação (KELLER, BRIESNER, 1990; LAMM, AYARS, NAKAYAMA, 2007).

Ao longo de algumas décadas, pesquisadores propuseram diferentes coeficientes para expressar a uniformidade da lâmina aplicada, com base em observações pontuais. O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), desenvolvido por Christiansen (1942), foi o primeiro índice proposto, sendo o mais utilizado para quantificação da uniformidade na distribuição da água em irrigação por aspersão convencional, e posteriormente utilizada também na avaliação dos sistemas de microaspersão. Depois que Christiansen propôs seu coeficiente, vários outros pesquisadores (BEALE; HOWEL, 1966; BENAMI; HORE, 1964; HART, 1961; HOWEL, 1964; WILCOX; SWAILES, 1947) desenvolveram e compararam vários métodos de avaliação da uniformidade com o objetivo de desenvolver um método mais adequado. Eles concluíram que para altos valores de CUC, o método do CUC apresenta excelente estimativa da uniformidade de distribuição da água. A equação de Christiansen é representada a seguir:

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{n x_m} \right] \quad (1)$$

Em que:

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %;

n - número de coletores na área na malha de distribuição;

x_i - lâmina de água coletada no i-ésimo coletor, em mm;

x_m - lâmina média, em mm.

Além do coeficiente de Uniformidade de Christiansen, outro coeficiente bastante utilizado para representação da uniformidade na irrigação é o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) originalmente apresentado por Keller e Karmeli (1974). Os autores usaram a relação entre as menores taxas de emissão com a taxa média de emissão média, que ocorreram dentro de um sistema, para estimar a uniformidade de emissão de um sistema de irrigação por gotejamento. Cabello (1986) esclarece que essa metodologia, leva em consideração os fatores de fabricação medidos pelo coeficiente de variação, e os fatores hidráulicos da instalação, devido às pressões diferentes a que estão submetidos os emissores. Este método é o recomendado pelo Serviço de Conservação de Solo dos Estados Unidos. Sua definição está expressa na equação (2), a qual é baseada na razão entre as vazões mínimas e a média dos emissores.

$$CUD = 100 \cdot \frac{l_n}{\bar{l}} \quad (2)$$

Em que:

CUD: uniformidade de Distribuição, %;

l_n : media de 25% das menores lâminas, mm h⁻¹;

$\bar{l}$: médias de todas as lâminas, mm h⁻¹.

O método do CUC correlaciona todas as lâminas medidas com a média, enquanto que o CUD correlaciona à média dos 25% menores valores de lâminas com a média total delas, pois, Ele enfatiza a importância de suprir a cultura com pelos menos à lâmina média de irrigação. Com isso, o segundo coeficiente é mais sensível para analisar menores uniformidades.

Por convenção, o valor de CUC igual a 80% é o mínimo aceitável para o desempenho normal do aspersor. Bralts (1986) e Christiansen (1942) apresentam os critérios para interpretação dos valores de CUC e CUD apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Critérios para classificação da Uniformidade de Distribuição

CUC	CUD	Us	Classificação
> 90%	> 84%	> 90%	Excelente
80% a 90%	68% – 84%	80% – 90%	Bom
70% a 80%	52% – 68%	70% - 80%	Regular
< que 70%	< que 52%	< 70%	Ruim

Alcançar uniformidade de distribuição perfeita é tecnicamente impossível, visto que, a área coberta pelos emissores é geralmente circular, enquanto os aspersores e os microaspersores são dispostos em configurações geralmente quadradas. Porém, altas uniformidades de distribuição são possíveis de serem alcançadas, desde que os fatores intervenientes na uniformidade (emissor, pressão de operação, espaçamento entre emissores, condições topográficas e climáticas) sejam criteriosamente controlados (CHRISTIANSEN, 1942; LAMM; AYARS; NAKAYAMA, 2007; RODRIGUES et al., 1997; WILCOX; SWAILES, 1947). Para assegurar uma boa uniformidade, deve haver superposição dos jatos de água nos dois sentidos, isto é, entre emissores ao longo da linha lateral e entre as laterais (PAIR, 1968; WILCOX, SWAILES 1947). O grau de superposição requerido depende do tipo de perfil, pressão de operação, velocidade e direção do vento. Sendo que, ao estudar 8 tipos de curvas geométricas (perfis), Wilcox e Swailes (1947) alertam que a disposição dos aspersores não deve ultrapassar 65% do diâmetro molhado.

A uniformidade de aplicação do aspersor é fortemente influenciada pela forma do perfil de distribuição (CHRISTIANSEN, 1942). Um padrão desejável do perfil deve ter taxas de aplicação

decrecendo continuamente a partir do emissor. Os perfis de formatos triangular clássico e retangular são os que produzem a distribuição mais uniforme sobre uma área, quando a pressão e o espaçamento são adequados (WILCOX; SWAILES, 1947). Na literatura citada, esses dois tipos de formato são os mais relatados em sistemas de aspersão. Já para a microaspersão, constata-se que a maioria dos perfis de distribuição são em forma de sino ou de exponencial cúbica. O formato de perfil em sino evidencia a inviabilidade da utilização do sistema de microaspersão para irrigações com sobreposições dos jatos, pois se obtém baixos valores de uniformidade de distribuição nos mais diversos espaçamentos, o que confirma a utilização desses apenas para irrigação de plantas isoladas (NASCIMENTO et al., 1999; NOGUEIRA, 1989).

Bilanski e Kidder (1958); Christiansen (1942); Pair (1968); Seginer (1963); Tarjuelo et al. (1999) esclarecem que é importante estabelecer a pressão de funcionamento do emissor, de modo que seja possível melhor distribuição de água, pois existe uma faixa de pressão ótima para cada emissor onde ocorre uma velocidade do jato com quebra satisfatória do jato em pequenas gotas e forma um perfil de distribuição desejável. Em aspersão, velocidade do jato maior que 20 m s^{-1} é suficiente para desintegração do jato em pequenas gotas (TARJUELO et al., 1999). Para pressões baixas demais, a velocidade de saída da água diminui, e a resistência do ar não é suficiente para desmanchar o jato de água em pequenas gotas, podendo o jato ficar com um alcance ligeiramente maior que o calculado e cair pesadamente no solo, ficando a parte intermediária do terreno com baixa precipitação. Para valores de pressão acima do ideal, a água emitida adquire alta velocidade e encontra grande resistência do ar e cai em forma de finíssima chuva mais próximo do emissor. Neste o extremo do círculo permanece com baixa precipitação. A pressão adequada, associada a um bom espaçamento dos emissores, de modo que haja superposição dos jatos, fornece uma distribuição mais uniforme.

O ângulo de inclinação do emissor com relação à horizontal afeta também a distribuição de água. Bilanski e Hidder (1958) avaliando a influência da inclinação do emissor em ângulos variando de 10° a 35° a intervalos de 5° , constataram que, com aumento do ângulo de inclinação, maiores raios molhados foram alcançados e os picos de intensidade de precipitação diminuíram, formando um perfil mais uniforme (Figura 4).

Figura 4 - Influência do ângulo de inclinação do aspersor no perfil pluviométrico (fonte: BILANSKI; KIDDER, 1958)

Rodrigues et al. (1997), avaliando a sensibilidade dos coeficientes de uniformidade quanto aos fatores: operação de serviço, espaçamento entre aspersores, velocidade do vento e altura da haste, diâmetro dos bocais, constatou que o espaçamento entre aspersores e linhas laterais foi o fator operacional que mais influenciou os coeficientes. Porém, o espaçamento é muito afetado pela direção e velocidade do vento, e com isso deve ser reduzido à medida que aumenta a velocidade do vento, a fim de assegurar uma uniformidade aceitável (CHRISTIANSEN, 1942; CONCEIÇÃO, 2002). Em áreas com baixa velocidade do vento, é comum a utilização de espaçamentos entre aspersores equivalentes a 65% do diâmetro molhado, enquanto naquelas em que a velocidade for maior que 4 m s^{-1} , o espaçamento deve ser equivalente a 30% do diâmetro molhado. Em locais em que a direção do vento for muito variável, o espaçamento deve aproximar-se da forma quadrada, que geralmente fornece melhor uniformidade. Portanto, a uniformidade de distribuição, além ser um indicador da qualidade de aplicação da irrigação, é o fator mais determinante do espaçamento entre os emissores.

2.5.2 Uniformidade da vazão ao longo da linha lateral

No sistema de irrigação por microaspersão, a uniformidade de aplicação de água ao longo da linha lateral está intimamente relacionada com a variação de vazão dos emissores. A qual é uma 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, com a qualidade da água, entupimentos, diâmetro dos bocais, com a qualidade da matéria-prima e dos processos de fabricação dos emissores (KELLER; KARMELI, 1974). As pequenas diferenças entre dois

emissores podem causar variações significativas na vazão do sistema. Keller e Karmeli (1974); Wu e Gitlin (1973); Wu, Barragan e Bralts (2007) recomendam uma variação de vazão de no máximo 10% na vazão ao longo da linha nos sistemas de irrigação de irrigação localizada, o que corresponde a uma variação de pressão de no máximo 20%.

A variação de pressão é algo inerente ao sistema devido às perdas de cargas que ocorre. Para tanto, Myers e Bucks (1972), propuseram uma solução gráfica através da utilização de emissores de diferentes tamanhos para uniformizar a vazão ao longo da linha lateral, enquanto Kenworthy (1972) propôs uniformizar a vazão ao longo da linha ajustando o comprimento de microtubos. Anos depois, foram desenvolvidos os emissores autocompensantes, que uniformizara a vazão através do uso de diafragmas que controla a passagem de água pelo bocal. Mais recentemente, Almeida et al. (2008) propuseram a introdução da técnica de microtubos aos sistemas de irrigação, conferindo alta uniformidade.

A variação de vazão a uma dada pressão é devida aos fatores: variabilidade de fabricação, inserção dos emissores, e as condições de uso do emissor. A variabilidade de fabricação (CV) pode ser minimizada pela aquisição de emissores de boa qualidade, para tanto, vários autores (BOMAN, 1989; DANTAS NETO et al., 1997; HOLANDA FILHO et al., 2001; NASCIMENTO et al., 1999) relatam diversos tipos de microaspersores com excelente qualidade (CV < 5%). A inserção dos emissores deve ser computada no cálculo das perdas de carga localizadas no momento do dimensionamento do sistema, melhorando assim, a uniformidade. Quanto ao tempo de uso do emissor, alguns trabalhos mostram que não existe uma correlação da idade com a diminuição da uniformidade, e sim com as condições de uso desses emissores, que estão relacionadas à fatores tais como manutenção e sistemas de filtragem eficientes.

Com relação à influência do tamanho dos bocais na uniformidade, Boman (1999) analisando microaspersores com diferentes diâmetros de bocais em um pomar de citros durante 3 anos, verificou que a uniformidade de aplicação foi severamente afetada pelos entupimentos ocorridos nos emissores de bocais de menor diâmetro. Visto que 22%, 14%, 7% e 5% dos emissores com bocais de 0,76 mm, 1,02 mm, 1,27 mm e 1,52 mm, respectivamente, tiveram que ser substituídos em virtude dos entupimentos ocorridos. Outro trabalho que demonstrou a influência do diâmetro dos orifícios dos emissores foi realizado por Souza (2005), que verificou aumento do coeficiente de variação em microtubos com a diminuição do diâmetro. Portanto, no dimensionamento de sistemas de irrigação localizada deve-se dar preferência quando possível a

utilização de emissores com orifícios de maiores diâmetros, de forma a conferir maior uniformidade de aplicação e reduzindo os problemas futuros de entupimentos.

Para se analisar a uniformidade da vazão de um sistema de irrigação localizada existem vários modelos estatísticos, baseados na variação da vazão, a qual é proporcional à distribuição de pressão ao longo do comprimento do tubo. Dentre eles, os métodos do CUC e o CUD, juntamente com o da uniformidade estatística, são os mais utilizados para medir a uniformidade de vazão na irrigação localizada, permitindo a obtenção de ótimos resultados.

A uniformidade estatística (U_s) foi primeiramente apresentada por Wilcox e Swailes (1947) quando avaliaram equipamentos de irrigação por aspersão (Equação 3). 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.

$$U_s = 100(1 - CV_q) = 100\left(1 - \frac{S_q}{\bar{q}}\right) \quad (3)$$

Onde:

U_s : uniformidade estatística;

CV_q : coeficiente de variação da vazão do emissor;

S_q : desvio padrão da vazão do emissor;

$\bar{q}$: média das vazões observadas.

Burt (2004) relata que os sistemas de irrigação por microaspersão têm melhorado sua uniformidade com o passar do tempo. Suas afirmações são baseadas na análise de avaliações realizadas em fazendas na região da Califórnia, nos Estados Unidos. Em 1996, o Programa de Avaliação de Sistemas de Irrigação da Universidade da Califórnia, avaliou 77 sistemas de microaspersão em fazendas da região e constataram que o CUD estava muito ruim (65%). Na mesma região, avaliações mais recentes (2004) constataram uniformidades de 80%. O autor conclui que essa melhoria na uniformidade deve-se às inovações realizadas nos sistemas: disponibilidade de emissores de melhor qualidade, maior rigor no dimensionamento hidráulico dos sistemas, sistemas de filtragem mais eficientes e as novas técnicas de injeção química.

Como pode ser visto boas uniformidades de aplicação podem ser alcançadas, desde que o dimensionamento e o manejo do sistema sejam realizados adequadamente.

2.6 Comentários finais

Da apreciação da literatura, observa-se que o microtubo foi um dos primeiros emissores utilizados na irrigação por gotejamento, mas, anos depois, outros emissores foram desenvolvidos e relegaram o uso dessa tecnologia a pequenas comunidades no continente africano e asiático. Verifica-se que os primeiros estudos detalhados sobre a hidráulica destes emissores foram realizados por Bucks e Myers (1973), e que mais recentemente o grupo de pesquisa em hidráulica da ESALQ-USP vem estudando de forma mais sistemática o uso dessa tecnologia nos sistemas de irrigação localizada.

O grupo propôs inicialmente o uso de tecnologia na irrigação por gotejamento de hortaliças e fruticultura. Para tanto, Souza e Botrel (2004) e Souza (2005) desenvolveram softwares de dimensionamento hidráulico e também avaliaram o desempenho do sistema nas mais variadas condições de uso. A introdução da tecnologia permitiu reduzir o custo das linhas laterais e emissores do sistema de gotejamento em aproximadamente 46%, além de conferir alta uniformidade de distribuição. Em seguida, o grupo inovou o sistema de microaspersão através da introdução da utilização de microtubos em microaspersores como mecanismo regulador de vazão (ALMEIDA, 2008), conseguindo conferir ao sistema alta uniformidade de vazão e baixo custo, quando comparado aos microaspersores autocompensantes.

O grupo da ESALQ-USP, dentro do qual o presente trabalho foi desenvolvido, também realizou estudos no desenvolvimento de emissores de microtubos para outras condições de irrigação por gotejamento (casas de vegetação e irrigação de sacolas de mudas em condições de viveiro), desenvolvimento de anteparos de microaspersores com microtubos e adaptação do microtubo aos microaspersores convencionais encontrados no mercado. Podendo-se com esta adaptação melhorar a eficiência em sistemas já instalados nas propriedades rurais. Sendo estes dois últimos assuntos do tema do presente trabalho.

2.7 Material e métodos

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Hidráulica e na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ-USP, onde foram desenvolvidos e avaliados os protótipos de microaspersores, bem como avaliado o desempenho da adaptação do microtubo aos microaspersores comerciais. A etapa de desenvolvimento visou estabelecer os melhores materiais, equipamentos e processos de construção a serem utilizados no desenvolvimento dos

microaspersores. Na etapa de avaliação foram determinados os diâmetros de microtubos, os comprimentos máximos de microtubo para uma boa distribuição em cada modelo testado, a relação pressão versus comprimento de microtubo para cada modelo, o perfil de distribuição da precipitação, a uniformidade de distribuição de água e a uniformidade de vazão.

2.7.1 Materiais e equipamentos utilizados

Os materiais utilizados no desenvolvimento dos microaspersores são mostrados na Figura 5: (a) microtubos comerciais e cabos de fio de eletricidade, nos quais foram determinados os diâmetros internos em projetor de perfil e a curva de pressão versus comprimento versus vazão para cada modelo de microaspersor; (b) Termoplásticos (technyl, polipropileno, teflon e PVC) usinados para construção da bailarina do microaspersor (as suas propriedades, informadas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 1); (c, d, g, h, i e j)) materiais utilizados no processo de moldagem para construção da bailarina; (e, f) pedras talco e sabão utilizadas no processo de usinagem para construir a bailarina.

A microretífica foi utilizada para cortar, lixar, esmerilhar e fresar no processo de construção dos microaspersores. As ferramentas de modelar utilizadas no processo de moldagem (Figura 6). Os testes preliminares do funcionamento dos protótipos de microaspersor foram realizados na cúpula. O gravador de madeira foi utilizado para abrir as canaletas em alguns modelos. As brocas diamantadas foram utilizadas para fazer as canaletas. A usinagem dos tarugos foi realizada no torno mecânico, com rotações de acordo com a velocidade de corte requerida para cada diâmetro e material.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos materiais utilizados no torneamento das bailarinas de microaspersor

Propriedades	PVC	technyl	Teflon	Polipropileno
Densidade (g/cm ³)	1,2 – 1,7	1,14	2,2	0,9
Ponto de fusão	273 ⁰ C	215 ⁰ C	300 ⁰ C	165 ⁰ C
Resistência à tração (Mpa)	4,2 – 50	80	200	38 – 55
Calor específico	0,2 – 0,28	0,4	0,25	0,46

Figura 5 - Materiais utilizados: microtubos e cabos de fio (a); tarugos tecnil, polipropileno, teflon e PVC (b); moldes de biscuit (c); formas de papel alumínio (d); pedra talco (e); pedra sabão (f); gesso (a); argila (h e j) e durepox (i)

Figura 6 - Ferramentas e equipamentos utilizados na construção dos protótipos: (a) microretifica com acessórios; (b) ferramentas para modelar; (c) pontas montadas; (d) Cúpula; (e) gravador de madeira; (f) brocas diamantadas; (g) broca de dentista; (i) torno mecânico

2.7.2 Desenvolvimento dos anteparos de microaspersores

2.7.2.1 Desenvolvimento do protótipo vibratório através da moldagem.

A construção do protótipo vibratório pelo processo de moldagem teve como objetivo obter um protótipo de anteparo de microaspersor, utilizando materiais de modelar (gesso, argila, biscuit e durepox), para construir um molde de silicone, que pudesse construir anteparos de microaspersores através da injeção de resinas termoplásticas.

Na construção deste protótipo, foram utilizadas fôrmas de formato cônico de papel alumínio e de PVC (diâmetro = 25 mm, altura = 7 mm e ângulo = 27°), para construir o defletor

de jato, e chapas de PVC, para construir o suporte do microaspersor vibratório (Figura 7b). Os tarugos de PVC foram utilizados para obter o formato desejado e o papel alumínio para facilitar o desprendimento do defletor quando seco. As dimensões do anteparo foram definidas em função da massa máxima que o jato de água poderia levantar, a qual foi determinada pela equação 4.

Figura 7 - Sequência da construção do protótipo vibratório pelo processo de moldagem: (a) materiais de modelar; (b) fôrmas de PVC e alumínio; (c, d, e, f, g) aplicação do gesso nas formas; (g) defletores antes e após a abertura das canaletas; (i) montagem das peças; (j) teste de funcionamento na cúpula

$$E = \gamma \frac{v^2}{2g} A \quad (4)$$

Em que:

E= empuxo do jato de água sobre o anteparo (Newton);

γ = peso específico da água (N m^{-3});

v = velocidade do jato de água (m s^{-1});

g = aceleração da gravidade (m s^{-2});

A= área do bocal do microaspersor (m^2).

O gesso foi diluído em água numa proporção de 1 : 0,75, misturando-se até atingir uma consistência pastosa e deixando-se repousar por um minuto. Em seguida, a pasta foi aplicada sobre a fôrma de papel alumínio (Figura 7d e 3e), colocando-se uma fôrma de PVC em cima para comprimir o gesso e evitar formação de bolhas de ar (Figura 7f). Quanto à argila, ao durepox e ao biscuit foi necessário apenas umedecê-los com água. O tempo de secagem variou de 15 minutos a 2 horas.

Após a secagem, o anteparo foi retirado da fôrma e foi realizado a abertura das canaletas com agulhas de aço, peças de modelar e a microretifica (Figura 7g e h). O protótipo foi montado, colando-se as peças (Figura 3i). O teste do funcionamento foi realizado na cúpula de acrílico (Figura 3j).

2.7.2.2 Desenvolvimento do protótipo vibratório através da usinagem

Para confecção deste protótipo foram utilizados termoplásticos (teflon, polipropileno, PVC e tecnil). O dimensionamento foi realizado em função da equação 1, para uma vazão disponível de 65 L h⁻¹, microtubo de 1,5 mm de diâmetro interno e velocidade do jato de água de 10 m/s.

Figura 8 - Sequência da construção do protótipo vibratório através da usinagem: (a) materiais utilizados; (b e c) usinagem do defletor e corpo do microaspersor; (d, e, f, g e h) abertura das canaletas e desbaste da parte superior do defletor; (i) corpo do microaspersor; (j) suporte; (l, m, n, o e p) peças prontas e microaspersor já construído; (q, r) testes realizados na cúpula

Para construir o defletor do jato, foi feito um cone (diâmetro de 25 mm, altura de 10 mm e ângulo de 27°) através da usinagem de tarugos no torno mecânico (Figura 8b), a uma rotação de 1500 rpm. O corpo do microaspersor foi construído através da usinagem de tarugos através da usinagem em torno mecânico até atingir o diâmetro de 13 mm. Depois, foi feito um furo de 2,5 mm com a broca do torno no sentido longitudinal da peça para passar o microtubo de mesmo diâmetro (Figura 8c). As canaletas do defletor seguiram trajetória em arco de 45° e profundidade de 1,5 mm. As canaletas foram abertas com brocas ortodônticas de diversos formatos acopladas na microretífica, a uma rotação de 10000 rpm (Figura 8d, e, f, g e h).

Para prender o suporte ao corpo do microaspersor foi feito uma arroela de PVC com diâmetro externo de 14 mm e interno de 9 mm (Figura 8). O suporte foi construído com tarugos de PVC 23 mm e diâmetro de comprimento e 3 mm de diâmetro (Figura 8j). A montagem do protótipo foi feito através da colagem das peças (Figura 8l e 4m). O microtubo foi conectado ao tubo de 7 mm

através de um adaptador (15x15x10 mm) construído de chapa de PVC furado no sentido longitudinal, com abertura de 2,5 mm de um lado e 7 mm no outro, correspondentes aos diâmetros externos do microtubo e do tubo (Figura 8n). Os testes de funcionamento foram realizados na cúpula de acrílico (Figura 8q e r).

2.7.2.3 Desenvolvimento do protótipo giratório com bailarina de degraus

O microaspersor giratório com bailarina de degraus foi idealizado com o objetivo de que cada canaleta da bailarina irrigasse determinadas distâncias do raio molhado. Com isso seria possível desenvolver um microaspersor com perfil de distribuição pluviométrica de formato triangular, variando o número de canaletas e a profundidade das mesmas.

Esse protótipo foi construído através da usinagem de tarugos de PVC, com 12 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro, sendo que de um lado foi feito um furo de 4 mm com broca no torno mecânico, e do outro lado um pino de PVC com comprimento de 7 mm e 2,4 mm de diâmetro (Figura 9a). As canaletas foram abertas com as brocas diamantadas, acopladas na microretífica a uma rotação de 10000 rpm, com ângulo de 20° , sendo que cada canaleta apresentava uma profundidade distinta (Figura 9b). O teste de funcionamento foi realizado na cúpula (Figura 9c).

2.7.2.4 Desenvolvimento do protótipo giratório com bailarina cônica com rotor

Esse protótipo foi desenvolvido com PVC variando o número de canaletas de 3, 4 e 6, e os ângulos do cone em 27° e 35° .

Esse protótipo seguiu a sequência mostrada na Figura 10:

- (a) Usinagem da bailarina no torno mecânico: A usinagem da bailarina no torno mecânico foi realizada na rotação de 1500 rpm (rotação escolhida em função do diâmetro da peça e velocidade de corte para os plásticos). A faca de corte foi montada na posição de 27° ou 35° , de acordo com o modelo. As dimensões da bailarina foram de 22 mm de diâmetro e 7 ou 10 mm de altura. Foi feito um furo no sentido longitudinal da bailarina, para colocar o rotor (alfinete), com brocas de 1 mm. A marcação dos comprimentos e aferição das peças foram feitas com o auxílio de paquímetro digital;
- (b) desenharam-se as canaletas da bailarina com o auxílio de um projetor de multimídia, projetando as canaletas feitas no software AutoCAD sobre a bailarina. A bailarina era colada em uma parede na altura do projetor, desenhando-se as canaletas com caneta de cor

azul, e, com caneta de cor vermelha, desenhava-se a área que não podia ser desbastadas, para facilitar a orientação na abertura das canaletas, pois, depois da primeira passada da broca sobre a cor azul, ela desaparece, restando a cor vermelha para orientar no acabamento final;

- (c) abertura das canaletas na profundidade de 1,5 mm utilizando-se a microretífica ou retífica protética com brocas protéticas de diversos formatos;
- (d) montagem das partes do microaspersor;
- (e) funcionamento dos microaspersores na cúpula.

Figura 9 - Protótipo tipo giratório com bailarinas em degrau: (a) usinagem da bailarina; (b) bailarinas antes e depois de abertas as canaletas; (c) teste de funcionamento do microaspersor

Figura 10 - Microaspersor giratório com bailarina cônica e pino de aço: (a) usinagem da bailarina no torno mecânico; (b,c) projeção das canaletas com projetor multimídia; (d) bailarinas antes e após a abertura das canaletas; (e) peças prontas e microaspersor pronto; (f) funcionamento do microaspersor na cúpula

2.7.2.5 Desenvolvimento do protótipo giratório com bailarina cônica

Figura 11 - Protótipos modelo bailarina com 6, 4 e 3 canaletas

Esse modelo foi construído com PVC, teflon, polipropileno e technyl, variando-se o número de canaletas de 3, 4 e 6, e os ângulos do cone em 27° e 35° . A construção do protótipo seguiu os passos mostrados Figura 11:

- (a) Serrar um tarugo de 10 cm de comprimento para ser usinado no torno (comprimento máximo para obter boa fixação);
- (b) usinagem da bailarina no torno mecânico: A usinagem da bailarina no torno mecânico foi realizada na rotação de 1500 rpm (rotação escolhida em função do diâmetro da peça e velocidade de corte para os plásticos). A faca de corte foi montada na posição de 0° para o desbaste das partes A e C e na posição de 27° ou 35° para a parte B, que apresenta formato cônico. A usinagem seguiu as dimensões da peça mostradas na figura 5. A marcação dos comprimentos e aferição das peças foram feitas com o auxílio de paquímetro digital;

Figura 12 - Dimensões da bailarina do microaspirador

- (c) abertura do furo da bailarina com broca de 4 mm na furadeira a rotação de 1500 rpm;
- (d) desenharam-se as canaletas da bailarina com o auxílio de um projetor de multimídia, projetando-se as canaletas feitas no software AutoCAD sobre a bailarina. A bailarina era colada em uma parede na altura do projetor, desenhando-se as canaletas com caneta de cor azul, e, com caneta de cor vermelha, desenhava-se a área que não podia ser desbastadas, para facilitar a orientação na abertura das canaletas, pois, depois da primeira passada da broca sobre a cor azul, ela desaparece, restando a cor vermelha para orientar no acabamento;
- (e) usinagem do adaptador do microtubo à bailarina: Esse adaptador tem a função de conectar a bailarina ao microtubo, e ele fica encaixado no suporte do microaspirador;
- (f) abertura das canaletas na profundidade de 1,5 mm, utilizando-se a microretífica ou retífica protética com brocas protéticas de diversos formatos;
- (g) desbaste da parte superior da bailarina com a microretífica na rotação de 10000 rpm com brocas esmerilhantes, para diminuir a massa da bailarina;
- (h) montagem das partes do microaspirador.

2.7.2.6 Desenvolvimento do protótipo giratório com bailarina cônica por prototipagem rápida

Os protótipos desenvolvidos a partir do processo de prototipagem rápida foram confeccionados no Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CenPRA), na cidade de Campinas- SP. O desenho foi o mesmo da Figura 12. O desenvolvimento desse protótipo seguiu a metodologia descrita no item 2.3.1 prototipagem.

2.7.3 Ensaios

Todos os ensaios utilizaram o mesmo cabeçal de controle. No cabeçal de controle continha um reservatório de 10000 L, uma bomba KSB 125H, instalada para fornecer pressão necessária para o funcionamento da linha de irrigação, um filtro de disco, registro de gaveta, regulador de pressão e manômetro digital.

2.7.3.1 Determinação do diâmetro e comprimento máximo de microtubos e cabos de fio

A determinação do comprimento máximo e do diâmetro do microtubo é função da vazão requerida por cada modelo de microaspersor. Os modelos de microaspersores foram testados em diferentes diâmetros (1 mm a 3,5 mm) e comprimentos de microtubos (10 a 40 cm) sob pressões variando de 150 a 300 kPa, sendo que a melhor combinação (diâmetro, comprimento máximo do microtubo e pressão) foi definida em função do maior raio de alcance do microaspersor. A vazão obtida nessa combinação foi utilizada para determinar as curvas de relação comprimento de microtubo versus pressão para cada modelo de microaspersor. Para obter essa relação, observou-se a pressão para diferentes comprimentos de microtubos que fornecesse a mesma vazão.

2.7.3.2 Uniformidade de distribuição pluviométrica e perfil de precipitação

Para a obtenção da superfície de distribuição pluviométrica dos microaspersor foi instalada uma malha de pluviômetros dispostos ao redor do emissor. Os pluviômetros utilizados foram recipientes plásticos medindo 8 cm de diâmetro e 10,5 cm de altura. Seguindo as normas da ABNT, os coletores formaram uma malha quadrada de 6 m x 6 m, espaçados equidistantes no espaçamento de 0,30 m x 0,30 m, de modo a cobrir a área molhada pelo emissor; as linhas ortogonais em relação à localização do emissor também serviram para a coleta de dados para a determinação do perfil de distribuição ao longo do raio. Após 1 hora de funcionamento, com o emissor submetido à pressão de serviço de 250 kPa, foram realizadas as leituras dos volumes de

água contida em cada coletor, em seguida, os volumes foram convertidos em altura de precipitação, cada microaspersor foi repetido três vezes. Após determinação das precipitações médias obtidas nos testes, foram determinados os perfis pluviométricos dos microaspersores, com seus respectivos raios efetivo.

O cálculo da intensidade de precipitação média foi efetuado pela expressão:

$$P = \frac{V}{At} \quad (5)$$

Em que:

P: intensidade de precipitação (mm h^{-1});

V: volume coletado no coletor (mL);

A: área do coletor (cm^2);

t: tempo de exposição (h).

Os volumes referentes às áreas de abrangência de cada coletor foram determinados multiplicando-se os valores de intensidade de precipitação pelas áreas dos anéis circulares correspondentes. Os limites de cada anel foram representados pelos raios correspondentes às metades das distâncias entre o coletor analisado e o coletor anterior e posterior. Assim, por exemplo, o anel circular referente ao coletor colocado a 1,80 m do microaspersor tinha raio interno 1,65 m (metade entre 1,8 m e 1,5 m) e raio externo 1,95 (metade entre 1,8 m e 2,1 m). O primeiro coletor foi considerado como correspondente a uma área circular com raio igual a 0,45 m (metade entre 0,30 m e 0,60 m).

Figura 13 - Malha de coletores (6 mx 6 m) para determinação da uniformidade dos microaspersores

Utilizou-se a metodologia proposta por Christiansen (1942) para a determinação do Coeficiente de Uniformidade. O perfil de distribuição foi obtido pela média das intensidades de precipitação dos coletores localizados em pontos equidistantes ao longo dos eixos ortogonais.

2.7.4 Adaptação dos microtubos aos microaspersores comerciais

O desempenho da adaptação dos microtubos aos microaspersores comerciais foi avaliado através de testes em laboratório e no campo. A relação comprimento de microtubo versus pressão de operação versus vazão foi determinada em seguida avaliou-se a uniformidade de distribuição de água ao longo da linha lateral.

2.7.4.1 Experimento de laboratório

O experimento em laboratório teve o objetivo de avaliar a uniformidade de vazão ao longo da linha lateral em três microaspersores comerciais, tendo o microtubo como bocal. Os três modelos adaptados foram o “A”, “B” e “C” (Figura 14). Para o modelo “A” duas diferentes configurações foram testadas (vazão e diâmetro molhado), descritos como A1 e A2.

Figura 14 - Microaspersores adaptados com microtubo trabalhando como bocal

Avaliou-se a relação vazão - comprimento de microtubo - pressão para o diâmetro molhado mais adequado do microaspersor, sendo que a melhor combinação (diâmetro, comprimento máximo do microtubo e pressão) foi definida em função do maior raio de alcance do microaspersor (mais próximo do informado pelo fabricante). A vazão obtida nessa combinação foi utilizada para determinar as curvas de relação comprimento de microtubo versus pressão para

cada modelo de microaspersor. Para obter essa relação, observou-se a pressão para diferentes comprimentos de microtubos que fornecesse a vazão nominal, tendo sido tomada a pressão de 250 kPa como máxima. Todos os testes foram realizados na ausência de vento. O diâmetro de microtubo escolhido para estes testes foi o de 1,5 mm (maior diâmetro disponível no mercado).

Foram utilizados no mínimo cinco comprimentos de microtubo, em cada configuração de microaspersor, para obter a relação acima comentada. Baseado no método de tentativa e erros, a pressão e o comprimento de microtubo foram determinados usando o critério da vazão nominal e o maior diâmetro (Tabela 2). Em cada teste, foram medidos a vazão e o diâmetro molhado. A pressão de operação para os diferentes modelos foi medida e comparadas com as obtidas pelas equações de Darcy-Weisbach e a de Blasius.

Tabela 2 - Características operacionais dos microaspersores comerciais fornecidas pelo fabricante

Modelo	Vazão (L/h)	Pressão (kPa)	Diâmetro molhado (m)
A	88	150	3,4-4,9
B	88	150	8,4
C	112	150	6,8

A vazão dos microaspersores foi medida através da pesagem do volume coletado durante o período de um minuto, em recipientes plásticos de 3 litros. A vazão foi então calculada pela média das seis repetições. O volume coletado de água em cada recipiente foi pesado em balança digital com precisão de 0,01 g, assumindo que a densidade da água é de 1 g cm^{-3} , porque o efeito da viscosidade pode ser negligenciado quando o fluxo é turbulento. Sendo assim, as variações na temperatura não causam diferenças significativas na vazão (RODRÍGUES- SINOBAS et al., 1999).

Com os valores de pressão e comprimento de microtubo ajustou-se uma equação para dimensionamento do sistema no campo.

2.7.4.2 Dimensionamento da linha lateral

O procedimento de determinação do comprimento máximo da linha lateral foi realizado seguindo o método trecho a trecho (eq. 5), onde a perda de carga foi calculada em cada segmento (n) da linha lateral. O máximo de comprimento de linha lateral, limitado pela variação de pressão

máxima permitida, foi obtido pela subtração da pressão máxima e mínima experimental, e a perda de carga em cada segmento foi calculada em uma planilha desenvolvida no Microsoft Excel.

$$H_n = H_{n-1} + \frac{f_n Se V_n^2}{D 2g} + (Z_{n-1} - Z_n) + H_{loc} \quad (6)$$

Onde H_n é a pressão no início de cada emissor (m); H_{n-1} é a pressão no início do emissor anterior (m); f_n é o fator de atrito em cada segmento (adimensional); Se é o espaçamento entre emissores (m); V_n é a velocidade de fluxo em cada segmento ($m s^{-1}$); D é o diâmetro do tubo (m); Z_{n-1} é a cota do ponto anterior (m); Z_n é a cota do ponto “n” and H_{loc} é a perda de carga localizada de inserção do emissor (m).

A perda de carga foi calculada usando a equação de Darcy-Weisbach, a qual depende do número de Reynolds (Re). Em cada passo, o número de Reynolds foi calculado para ser usado na equação do fator de atrito (f_n). Em alguns segmentos no final da linha lateral onde ocorreu regime laminar, $Re \leq 2000$, f_n é calculado por:

$$f_n = \frac{64}{Re_n} \quad (7)$$

Onde Re_n é o número de Reynolds (adimensional) nos segmentos entre emissores.

A equação de Blasius (eq. 7) foi utilizada apenas nos segmentos onde o regime era turbulento ou de transição, $Re > 2000$. No geral, o regime de transição é considerado turbulento (BAGARELLO et al., 1997; HATHOOT; AL-AMOUD, 1993; JAIN et al., 2002), porque em linhas laterais com menos de 60 emissores, em poucos segmentos, ocorre esse tipo de regime. Neste trabalho, no máximo dois segmentos em cada linha lateral apresentou regime de transição, por isso a equação de Blasius foi utilizada.

$$f_n = \frac{0,316}{Re_n^{0.25}} \quad (8)$$

A perda de carga local causada pela inserção do conector do emissor foi calculada pela equação ajustada por Cardoso e Frizzzone (2007), específica para este tipo de conector e diâmetro de tubo (eq. 8), baseada na equação do índice de obstrução e baixa influencia do número de Reynolds. Estas perdas foram significativas, comparadas com a perda de carga total.

$$hf_{Loc(n)} = 0,2074 \frac{V_n^2}{2g} \quad (9)$$

Onde V é a velocidade de fluxo em cada segmento ($m s^{-1}$).

O diâmetro interno do tubo da linha lateral foi medido em projetor óptico com seis repetições (13,074 mm).

2.7.4.3 Avaliação em campo

No levantamento das vazões no campo, os emissores foram numerados em ordem crescente do início para o fim da linha lateral (Figura 15). 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 15). Estes recipientes foram previamente numerados e pesados. O tempo de coleta da vazão foi de aproximadamente 3 minutos, controlado por um cronômetro digital, com precisão de centésimos de segundo. Foram feitas três repetições na coleta das vazões de cada emissor. A pressão no início e final da linha foi monitorada por um manômetro digital, com precisão de uma casa decimal, em mca, instalado em cada extremidade, no início e no final de cada coleta. Visualmente, não foram verificados entupimentos nos emissores.

As coletas de vazão foram feitas em todos os emissores ao longo da linha lateral. Após o término do tempo de coleta, procedeu-se a pesagem em balança digital com precisão de 0,01 g, instalada ao lado da linha lateral. A temperatura foi medida para calcular o peso específico da água. A vazão foi calculada pela média das três repetições. As condições experimentais nas quais foram feitos os testes nos quatro microaspersores encontram-se na Tabela 3.

Figura 15 - Experimento de campo com os microaspersores comerciais com microtubos

Tabela 3 - Valores experimentais dos parâmetros hidráulicos do sistema de irrigação por microaspersão com microtubos

	A1	A2	B	C
Declividade (%)	2,76	2,83	2,77	2,99
Pressão máxima (kPa)	245	245	245	245
Pressão mínima (kPa)	75	93	96	149
Linha lateral (m)	68	58	50	40
Emissores	34	29	25	20

A uniformidade de distribuição (CUD) (eq. 2) e a uniformidade estatística (Us) (eq.3) foram utilizadas para avaliar o desempenho dos microaspersores adaptados, seguindo os critérios de classificação propostos por Bralts (1986).

2.7.5 Programas de software

Com dados obtidos na malha de coletores, simulou-se a uniformidade de água em diversos espaçamentos, através dos programas Space e Excel, para obtenção da melhor sobreposição. A uniformidade dos microaspersores foi avaliada através das expressões de coeficiente de uniformidade de Christiansen e uniformidade de distribuição (UD), citadas no item 1.3.

Para a simulação dos espaçamentos entre microaspersores, foi tomado como referência o arranjo quadrado. A simulação foi feita para espaçamentos de 2 m x 2 m até 4 m x 4 m, com incrementos de 0,5 m para cada simulação, fazendo-se a superposição para cada combinação de espaçamento, e calculou-se a uniformidade com os totais superpostos em cada pluviômetro.

Os dados também foram plotados no programa Sufer para fazer os diagramas pluviométricos dos microaspersores.

2.8 Resultados e discussão

2.8.1 Materiais utilizados no processo de usinagem

O primeiro material que foi utilizado na construção dos protótipos microaspersores foi o PVC. Esse material apresentou super aquecimento na usinagem, devido ao baixo calor específico (Tabela 1). Com o aquecimento, o material amolece um pouco, dificultando o desbaste da peça.

Para minimizar esse problema, reduziu-se o avanço da faca de corte e adicionou-se óleo de mamona sobre a peça, durante o corte. A usinagem do pino da bailarina foi muito difícil de ser realizada, pois no avanço da faca de corte o pino quebra-se com muita facilidade, já que esse movimento exige que o material suporte uma alta tensão de cisalhamento. Essa quebra também ocorreu várias vezes na etapa de teste, durante o encaixe da bailarina no suporte do microaspersor. A suscetibilidade do pino da bailarina à quebra deve-se a baixa resistência à tração do PVC (Tabela 1).

O PVC na forma de tarugo apresenta alta densidade, com isso, a peça apresenta uma massa maior do que os anteparos encontrados no mercado (fabricados comumente com PVC injetado ou polipropileno injetado, que têm densidades menores), exigindo uma maior vazão para girar a bailarina. As imperfeições das peças (asperezas, rebarbas e mau acabamento) aumentam a resistência ao giro da bailarina, requerendo maiores vazões.

Em virtude dessas dificuldades, testaram-se outros materiais com propriedades físicas (menor densidade, maior resistência térmica e ao cisalhamento) mais apropriadas para a construção, dentre eles, foram testados teflon, polipropileno e technyl.

O polipropileno no processo de usinagem torceu-se no momento de construir o pino da bailarina e ofereceu muita resistência à frisação na abertura das canaletas. O teflon foi o material que mais apresentou dificuldade na usinagem, devido a sua facilidade à torção. A peça enverga-se durante o avanço da faca de corte, dificultando a execução do desbaste. Já a usinagem do technyl foi a mais fácil, permitindo construir o pino da bailarina com alta resistência à tensão de cisalhamento. Porém, na abertura das canaletas, o material aquece muito, resultando em muitas rebarbas.

Na tentativa de reduzir o aquecimento ocorrido durante a usinagem e frisação, utilizou-se nitrogênio líquido. Porém a aplicação do nitrogênio sobre a peça na usinagem inviabilizou a sua utilização, já que se fez necessário retirar a peça várias vezes do torno para resfriá-la, mergulhando-a no nitrogênio líquido, pois, ao aplicar o nitrogênio diretamente sobre a peça, é formada muita fumaça e não se obtém bom resfriamento.

Dentre os materiais testados, o PVC e o technyl foram os que apresentaram mais facilidade na construção das bailarinas, porém, o PVC foi escolhido devido ao melhor acabamento das canaletas.

2.8.2 Construção da bailarina do anteparo por moldagem

Na construção dos anteparos do tipo vibratório, utilizaram-se materiais de modelar: gesso, argila, durepox e biscuit. Pois o objetivo era de fazer um protótipo que, ao ser colocado em silicone, formasse um molde para construir os anteparos utilizando resinas termoplásticas. Os protótipos de gesso foram os que apresentaram mais facilidade de construção. Quando testados, inicialmente apresentaram bom funcionamento e boa vibração, porém, em menos de 5 minutos, o jato de água proveniente do microtubo rompeu o gesso, fazendo um furo na peça impedindo a vibração do microaspersor. Isso inviabilizou o uso do gesso, pois é imprescindível avaliar o funcionamento da bailarina para obter resultados de seu funcionamento, antes de desenvolver o molde em silicone.

Os anteparos de argila, embora um pouco mais resistentes que o gesso, também apresentaram o mesmo problema nos testes de funcionamento. Sua construção é um pouco mais difícil do que a do gesso, devido à plasticidade da argila. Esse material quando manuseado tende a colar nas fôrmas de alumínio e PVC.

Os anteparos de durepox foram os mais difíceis de serem construídos, devido à plasticidade quando úmido, e principalmente a dificuldade de esculpir as canaletas quando o material seca, gerando peças com um acabamento muito ruim. Esse material apresenta alta densidade, conferindo muito peso a bailarina, acarretando no não funcionamento dos protótipos nos testados realizados.

Os anteparos de biscuit não apresentaram resultados satisfatórios em nenhuma das etapas de construção, mesmo sendo um material fácil de modelar, ele não adquiriu formato estável, pois ao ser retirado das fôrmas de alumínio e PVC ele perdia o formato adquirido na fôrma.

Com esses resultados, concluí-se que esses materiais de modelar e essa técnica não são adequados para construir os protótipos.

2.8.3 Construção do protótipo vibratório através da usinagem

Esse modelo de microaspersor foi o que apresentou mais dificuldade de construir, devido a sua complexidade. Para o movimento de vibração ocorrer adequadamente, todas as partes constituintes do microaspersor devem estar muito bem dimensionadas, para que o jato de água intercepte o centro do defletor e inicie a vibração, uma vez que, se alguma parte do microaspersor estiver com a dimensão fora do dimensionado, o microaspersor tende a ficar parado, inclinado

para um dos lados. E como a oficina do departamento é carente de equipamentos para trabalhos com peças muito pequenas, caso do microaspersor desenvolvido, construir as peças mediante o dimensionamento não foi tarefa fácil. Com isso, muitas tentativas foram realizadas até alcançar o funcionamento desejado. Construía-se o microaspersor e se realizava o teste de funcionamento na cúpula, para diagnosticar as causas do funcionamento irregular e buscar soluções para as mesmas.

A maior dificuldade foi obter um movimento de vibração estável, pois geralmente a vibração se iniciava, mas logo em seguida parava. Para uma vibração adequada, a haste do microaspersor deve ser bem firme. As hastes desenvolvidas para microaspersão geralmente são flexíveis e dificultam uma vibração estável, sendo que nos testes foi preciso segurar a haste no momento da vibração.

Mas depois de desenvolvido esse protótipo, foi descoberto que uma empresa multinacional do ramo da irrigação desenvolveu um modelo de microaspersor com as mesmas características. Sendo assim, parou-se com os testes de desenvolvimento do modelo, pois a inovação do modelo tinha sido perdida.

2.8.4 Construção do protótipo giratório com bailarina em degraus

A construção desse protótipo foi muito difícil, devido, ao tamanho reduzido da bailarina, a dificuldade de se construir o pino e o divisor de águas das canaletas. Como a bailarina era muito pequena, foi difícil variar a profundidade das canaletas, principalmente as mais superficiais, pois nelas o jato de água não percorrer o caminho das canaletas. A rotação da bailarina ficou comprometida, pois não se conseguiu construir o pino na própria peça, utilizou-se um pino de aço que não apresentou boa centralização. Porém o mais difícil foi construir o divisor de águas das canaletas, pois a construção dessa parte é muito minuciosa para ser realizada com a microretífica.

Todas essas limitações geraram muitas imperfeições na bailarina. O jato de água não percorreu as canaletas, portanto, não foi gerada a força para a bailarina girar. A não centralização do pino também contribuiu para impedir a rotação.

2.8.5 Construção do protótipo giratório com bailarina cônica com eixo metálico

A construção desse protótipo foi a de menor dificuldade, devido à experiência adquirida com os trabalhos anteriores e a simplicidade da bailarina. Nos testes de funcionamento foi o protótipo que apresentou maior rotação, pois o rotor (alfinete) apresenta uma baixa resistência à rotação. Porém a área molhada ficou parecida com a de um microaspersor setorial, pois o protótipo só

irrigou de um lado. Isso foi devido ao rotor não ter sido fixado centralizado. Várias tentativas foram feitas para centralizar esse rotor, mas nenhuma apresentou resultados satisfatórios. Os problemas na abertura do furo para o pino se devem ao diâmetro (1 mm) reduzido da broca utilizada no torno e a heterogeneidade da densidade do PVC, com isso a broca entortava-se durante a furação.

2.8.6 Construção do protótipo giratório com bailarina cônica

Esse protótipo é o resultado das melhorias efetuadas para resolver o problema de centralização do rotor do modelo anterior. Nesse modelo um pino foi construído na própria peça, e do outro lado foi feito um rebaixamento que se encaixa no adaptador de microtubo. A construção desse pino no torno mecânico exige muito paciência, pois o pino tem um diâmetro muito reduzido (2,4 mm) e o PVC tem uma baixa resistência a tração, com isso ele fica frágil. Ocorreram muitas quebras do pino durante sua construção e também na montagem do microaspersor. Utilizando-se os outros materiais (PVC, teflon e polipropileno) com maior resistência à tração, não se observaram quebras, por outro lado, a flexibilidade desses materiais fez o material envergar-se durante o avanço da faca do torno. Com a construção do rebaixamento, que encaixa no adaptador de microtubo, aumentou-se a dificuldade de construção do divisor de água das canaletas. Esses artifícios utilizados para substituir o rotor permitiram que os protótipos irrigassem um círculo de 360°. Porém aumentou a resistência à tração, requerendo maior vazão para girar os microaspersores, tendo sido necessário aumentar o diâmetro dos microtubos para diâmetros acima dos encontrados no mercado.

No geral, esse modelo de protótipo foi o único que apresentou resultados satisfatórios. Com isso, foram construídos vários protótipos, variando-se o número de canaletas e ângulos da bailarina. Um artifício utilizado para obter perfis pluviométricos de formato triangular, em alguns protótipos, foi o uso de defletores (massa de durepox) em algumas canaletas, de forma a concentrar o volume de água mais próximo do emissor.

2.8.7 Perfil pluviométrico de distribuição de água dos protótipos de microaspersores

Os perfis de distribuição de água variaram bastante entre os protótipos de microaspersores (Figuras 16, 17,18). Vários autores (BOMAN, 1989; BOTREL, 1984; HOLANDO FILHO et al., 2000; MATOS et al., 1996; NOGUEIRA, 1989), ensaiando vários modelos de microaspersores, também encontram características similares, o que pode ser atribuído aos processos de fabricação,

a geometria dos emissores e ao ângulo de inclinação do jato contra a superfície. Porém, os raios de alcance não apresentam grandes discrepâncias entre os diferentes protótipos desenvolvidos. Foi considerado como raio efetivo aquele correspondente à distância do emissor ao último coletor que registrou, no mínimo, 10% da precipitação média.

Figura 16 - Perfil de distribuição de água dos protótipos de microaspersor com 3 canaletas

Nos perfis referentes aos protótipos com 3 canaletas e 35°, verifica-se que o raio de alcance do emissor foi de 3 m (Figura 16). A maior precipitação ocorreu próximo ao emissor, com um valor de 12 mm h⁻¹. Para o protótipo com 35° e 1 defletor, a maior intensidade de precipitação foi igual a 37 mm h⁻¹, sendo registrada a uma distância de 0,3 m, enquanto o raio de alcance foi igual a 3 m. O raio de alcance para o protótipo de 27° foi de 2,7 m e a maior taxa de aplicação foi 14 mm h⁻¹, que ocorreu a 1,8 m de distância. Enquanto o de 27° com 1 defletor o raio de alcance de apenas 1,5 m e maior precipitação de 41 mm h⁻¹ ocorreu a 0,3m de distância. Para o protótipo confeccionado pelo processo de prototipagem rápida, o raio de alcance foi de 2,7 m e maior precipitação foi de 16,6 mm h⁻¹, ocorrendo a 1,5 m. O raio de alcance para o protótipo com 1

canaleta de ângulo diferenciado foi de 2,7 m, a maior precipitação foi de 41 mm h^{-1} que ocorreu a 0,6 m de distância. Verifica-se que os maiores raios foram alcançados com os protótipos com bailarinas de maior ângulo, corroborando com Bilanski e Kidder (1958), que observaram que os aspersores com maiores ângulos de inclinação do jato obtiveram maiores raios de alcance.

Observa-se que os artifícios de utilizar defletor em uma canaleta, bem como o de construir uma canaleta com ângulo diferenciado contribuíram para mudar o formato do perfil pluviométrico, deixando-o mais parecido com o triangular. Entretanto, o pico de precipitação ocorreu mais afastado do emissor, além de ter aumentado a taxa de aplicação para valores altos, incompatíveis para as taxas de infiltração da maioria dos tipos de solos. O protótipo com 35^0 apresentou precipitação ($6,8 \text{ mm h}^{-1}$) uniforme ao longo de todo o raio, o seu tipo de perfil pluviométrico é ideal para irrigar plantas isoladamente e também para irrigações em áreas com sobreposição. Já os protótipos confeccionados por prototipagem rápida e o com canaletas diferenciadas apresentaram perfis de formato de sino, mais adequados para irrigar plantas isoladamente. Embora a maior taxa de aplicação do protótipo confeccionado com prototipagem rápida tenha ocorrido a 1,5 m, enquanto o de 35^0 ocorreu próximo do emissor, suas precipitações médias apresentaram valores similares, $7,6$ e $6,8 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente. Isso mostra que o processo de confecção por usinagem permite confeccionar protótipos com bons resultados preliminares.

Observa-se que os raios de alcance obtidos com os protótipos de quatro canaletas apresentaram grande semelhança, entre si, 2,4 m. O perfil do protótipo com 27^0 foi em formato de sino, onde a precipitação máxima ocorreu a 1,2 m de distância a uma taxa de $23,8 \text{ mm h}^{-1}$. Já o protótipo de 27^0 com defletor, a maior precipitação foi registrada mais próxima do emissor (33 mm h^{-1} a 0,3 m de distância), seguida de uma redução gradual dessa precipitação com uma posterior pequena elevação da mesma e um decréscimo até o final. Constata-se que o defletor conseguiu mudar o ponto de maior precipitação, entretanto, essa segunda elevação é indesejável. A maior precipitação nos protótipos de 35^0 , sem e com defletor, ocorreu na mesma distância (0,6 m), com valores de $24,7 \text{ mm h}^{-1}$ e 29 mm h^{-1} , respectivamente. Nesse caso, o defletor apenas aumentou o pico de precipitação, não conseguindo concentrar a vazão mais próxima ao emissor.

Figura 17 - Perfil de distribuição de água dos protótipos de microaspersor com 4 canaletas

Os protótipos de 4 canaletas apresentaram raios de alcance praticamente iguais (aproximadamente 2 m), nesse modelo não houve a influência do ângulo da bailarina no alcance do raio (Figura 17). Os perfis dos protótipos sem canaletas foram iguais, de formato em sino, já os com defletores apresentaram picos acentuados, porém distantes dos emissores, o que indica que o defletor deveria ter sido construído mais no início da canaleta.

Figura 18 - Perfil de distribuição de água dos protótipos de microaspersor com 6 canaletas

Os protótipos de 6 canaletas apresentaram raios variando de 2,1 m a 3 m (Figura 18). O protótipo com 27^0 apresentou o menor raio de alcance, 2,1 m, com a maior precipitação ($29,8 \text{ mm h}^{-1}$), ocorrendo a 0,9 m. O protótipo de 27^0 com defletores registrou a maior precipitação ($46,7 \text{ mm h}^{-1}$), que ocorreu a 0,3 m. O protótipo de 35^0 registrou a maior precipitação ($17,8 \text{ mm h}^{-1}$), a 1,2 m de distância, já o com defletor ocorreu próximo do emissor (a 0,3 m) com valor de $30,8 \text{ mm h}^{-1}$. Enquanto os raios de alcance para esses dois protótipos foram de 2,7 m e 2,4 m, respectivamente. Observa-se que o defletor trouxe o pico de precipitação para mais próximo do emissor. O protótipo com 2 canaletas diferenciadas registrou o maior raio desse modelo (3 m), sendo que a maior precipitação ($14,4 \text{ mm h}^{-1}$) ocorreu a 0,6 m de distância. Para o protótipo confeccionado com prototipagem rápida, a maior precipitação foi igual a 28 mm h^{-1} , sendo registrada a uma distância de 0,9 m, enquanto o raio foi de 2,4 m.

Verifica-se, que para os diferentes modelos de protótipos os defletores alteram o formato do perfil de distribuição de precipitações sem alterar significativamente o alcance do jato. Podendo ser utilizado para gerar perfis de formato, desde que, o mesmo seja dimensionado para evitar intensidades de precipitação indesejadas.

Os raios de alcance encontrados para os protótipos desenvolvidos variaram entre 2,1 m e 3 m, são similares aos encontrados por Boman (1989); Holanda Filho et al. (2001); Nascimento et al. (1999); Sampaio et al. (1996), que relatam valores variando entre 2,2 m e 3,3 m.

Conforme os resultados das Figuras 16 a 18 verificam-se que a taxa de aplicação ultrapassou 10 mm h^{-1} . Esses valores de intensidade de precipitação apresentam-se muito altos comparando-se aos encontrados por Holanda Filho et al. (2001); Nascimento et al. (1999); Sampaio et al. (1996), que encontraram valores máximos variando de 2 mm h^{-1} a 7 mm h^{-1} , para alguns emissores giratórios. Por outro lado, Boman (1989); Nogueira (1989); Sampaio et al. (1996), entre outros, encontraram valores variando de 21 mm h^{-1} a 140 mm h^{-1} em alguns microaspersores giratórios e difusores. Deve-se atentar para o fato de que taxas acima de 15 mm h^{-1} são incompatíveis com a taxa de infiltração básica de alguns solos agrícolas. Constatando a necessidade de dar continuidade no desenvolvimento desses protótipos, no intuito de diminuir a densidade desses protótipos, com conseqüente redução na vazão requerida pelo microaspersor e intensidade de aplicação.

No geral, os protótipos com menores ângulos de inclinação apresentaram maiores picos de intensidades de precipitação, e o raio foi um pouco menor. Bilanski e Kidder (1958) também fizeram observações semelhantes em aspersores.

2.8.8 Distribuição do percentual do volume de água

Multiplicando-se as intensidades de precipitação pelas áreas dos anéis circulares correspondentes aos pluviômetros, obtiveram-se os volumes relativos a cada distância radial. Essas informações são úteis quando os microaspersores tiverem que trabalhar isoladamente, sem que haja sobreposições.

Para os protótipos com 3 canaletas, o maior percentual do volume de água aplicado se situou entre 1,2 m e 2,4 m, representando cerca de 70% do total para os protótipos de 27° sem defletor e o de 35° confeccionado por prototipagem rápida (Figura 19). Enquanto os protótipos de 27° com defletor, o de 35° com uma canaleta diferenciada e o de 35° com defletor, o maior percentual do volume de água aplicado situou entre o emissor e 1,2 m, representando 90%, 55% e 56% do total, respectivamente. Observa-se que os artifícios utilizados para aplicar a água mais próxima do emissor resultaram em intensidades de aplicação excessivas, principalmente para o protótipo de 27° com defletor. Por outro lado o protótipo de 35° sem defletor distribuiu melhor o volume entre as 0,6 m a 3 m.

Todos os protótipos com 4 canaletas concentraram o maior do volume aplicado no intervalo entre 0,6 m e 1,8 m, representando 80% para os protótipos de 27° sem defletor e 35% com defletor e cerca de 66% para os protótipos de 27° com defletor e 35° sem defletor (Figura 20). O uso de defletores permitiu concentrar o volume mais próximo do emissor, sendo que o de 27° aumentou a concentração no intervalo entre o emissor e 0,6 m e reduziu no intervalo de 0,6 m a 1,8 m, sem alterar o raio de alcance do emissor. Porém, o de 35° apenas aumentou a concentração que já ocorria no intervalo entre 0,6 m e 1,8 m, em detrimento do raio de alcance do protótipo.

Verifica-se que a distribuição percentual para os protótipos com 6 canaletas de 27° sem defletor (Figura 21), os de 35° com e sem defletor e o confeccionado por prototipagem rápida apresentam comportamentos semelhantes, pois registraram os maiores percentuais de volume de água aplicado entre 0,6 m e 1,8 m, com diferença que o de 27° obteve uma concentração excessiva (83% do total), enquanto nos outros três a concentração foi em média de 60% do total. O protótipo de 27° com defletor foi o único protótipo de 6 canaletas em que o maior percentual do volume aplicado ocorreu entre o emissor e 1,2 m, representando 68% do total. Para o protótipo

com duas canaletas de ângulos diferenciados, houve certa uniformidade na distribuição percentual dos volumes aplicados ao longo do raio, com maior volume aplicado entre as distâncias de 1,2 m e 1,8 m, porém sem ultrapassar 50% do total.

Figura 19 - Distribuição percentual dos volumes para o protótipo com 3 canaletas

Figura 20 - Distribuição percentual dos volumes para o protótipo com 4 canaletas

Para todos os protótipos que utilizaram defletores, ocorreu um incremento no volume percentual nas distâncias mais próximas ao emissor, concentrando o maior volume entre o emissor e 1,8 m, e uma redução abrupta em seguida na faixa de 1,8 m e 3 m, reduzindo o raio de alcance dos microaspersores. As reduções do volume percentual, na faixa de 1,8 m a 3 m, em função do uso de defletores, variaram entre 1% e 35%, mostrando a falta de padrão no dimensionamento desses defletores. Esses defletores são mecanismos viáveis de serem utilizados no intuito de alterar o formato do perfil geométrico, desde que os mesmos sejam bem dimensionados para evitar a diminuição do alcance do raio.

As distribuições percentuais têm uma implicação direta na eficiência de aplicação do sistema, considerando-se essa eficiência como a relação entre o volume de água armazenado na região radicular da cultura e o volume total aplicado (FRIZZONE, 1992). Se a cultura apresentar um sistema radicular pouco desenvolvido, a maior parte do volume aplicado pelo microaspersor não ficará disponível para a cultura e a eficiência de aplicação será baixa (CONCEIÇÃO, 2002).

Figura 21 - Distribuição percentual dos volumes para o protótipo com 6 canaletas

2.8.9 Uniformidade de distribuição espacial dos protótipos de microaspersores

Para as superposições propostas, verifica-se que as melhores superposições ocorreram com o protótipo de 6 canaletas de 35° e duas canaletas diferenciadas (Tabela 4). Sendo possível a utilização deste protótipo de microaspersores, em diversos espaçamentos, considerando-se que o critério usual de valores de CUC maiores ou iguais a 80% são satisfatórios (CHRISTIANSEN,

1942). Este protótipo apresentou bons valores de CUC e CUD para todos os espaçamentos estudados, sendo que os maiores valores ocorreram nos menores espaçamentos. No entanto, convém salientar que nem sempre o espaçamento com maior uniformidade é o mais econômico. Nesse caso, o espaçamento de 4 m x 4 m seria o mais recomendado para o protótipo, permitindo redução no custo por área irrigada, sem prejuízo considerável da uniformidade, conforme valores recomendados acima. Estes dados confirmam o bom perfil de distribuição de água apresentado por este protótipo quando operando isoladamente, pois este protótipo possui uma superfície mais uniforme, com perfil próximo ao retangular e maior raio de alcance (Figura 18).

A introdução de dois ângulos diferentes nas canaletas no protótipo de 6 canaletas 35°, melhorou os perfis de distribuição e uniformidade de distribuição, quando comparado com o protótipo de 6 canaletas 35° de ângulos iguais.

A área sombreada na Tabela 4 indica situação em que o microaspersor apresenta uniformidade dentro do recomendado pela literatura, adotando-se o limite mínimo de 80%. Com isso, para o espaçamento de 3 m x 3 m, os três protótipos de 35° (3, 4 e 6 canaletas) apresentaram também CUC satisfatórios (maiores que 80%), enquanto os de 27° apresentaram valores de CUC insatisfatórios (menor de 70%), o que pode ser atribuído ao fato de os protótipos com menores ângulos apresentarem uma maior concentração de água na faixa intermediária do perfil, com maiores picos de intensidade de precipitação e a redução brusca da intensidade da precipitação na periferia, como também a baixa precipitação próxima ao emissor. Por outro lado, os protótipos de maior ângulo apresentaram perfis que se caracterizaram por aplicar à maior lamina de água mais próxima do emissor, por menores picos de intensidade de precipitação e pela redução gradativa da precipitação ao longo do raio molhado. Portanto, esses foram mais adequados para se fazer à superposição dos perfis e alcançaram melhores uniformidades na sobreposição dos jatos. Estas observações são coerentes às afirmações de Bilanski e Kidder (1958); Christiansen (1942), onde a uniformidade de aplicação do aspersor é fortemente influenciada pela forma do perfil de distribuição, e que os emissores com maiores ângulos de inclinação apresentam perfis pluviométricos mais adequados para sobreposições.

Considerando que o raio de alcance dos protótipos varia de 2,5 m a 3 m, os espaçamentos que apresentaram maior eficiência são aqueles em que a sobreposição dos jatos é maior que 100%. Observações semelhantes já tinham sido feitas por outros autores, trabalhando com aspersores. A definição dos espaçamentos levou em consideração as recomendações da literatura,

onde o espaçamento entre emissores deve está compreendido entre $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ do diâmetro molhado e que a distância entre linhas laterais não devem ultrapassar $\frac{2}{3}$ do diâmetro molhado do emissor (CHRISTIASSEN, 1942; KELLER; BRIESNER, 1990; PAIR, 1968; SEGINER, 1963; TARJUELO et al, 1999; WILCOX; SWAILES, 1947).

Tabela 4 - CUC e CUD dos protótipos de microaspersores para diversos espaçamentos de microaspersores em m (arranjo quadrangular)

Protótipo	Defletor	Ângulo (^o)	CUC					CUD				
			2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4
6 canaletas	sem	27	70	67	66	41	13	52	50	46	13	2
6 canaletas	2	27	88	81	71	55	37	83	77	63	43	26
6 canaletas	sem	35	90	86	85	78	65	85	78	76	65	45
6 canaletas	2	35	89	84	78	61	50	85	78	72	49	36
6 canaletas*	sem	35	94	93	87	84	83	90	87	80	73	74
6 canaletasPR	sem	35	88	83	80	74	60	80	71	73	61	46
4 canaletas	sem	27	80	66	70	67	57	68	50	52	55	41
4 canaletas	1	27	77	72	67	48	27	64	60	49	27	15
4 canaletas	sem	35	87	83	83	73	58	82	75	77	59	38
4 canaletas	1	35	82	79	76	64	38	71	64	62	36	9
3 canaletas	sem	27	77	86	64	50	67	65	60	39	47	51
3 canaletas	1	27	80	73	52	17	0	69	54	19	2	0
3 canaletas	sem	35	88	87	80	77	76	84	80	69	65	65
3 canaletas	1	35	87	74	68	60	54	81	61	63	55	51
3 canaletas**	sem	35	74	64	61	54	46	64	61	57	58	50
3 canaletasPR	sem	35	93	79	69	67	68	89	71	52	45	52

*- 6 canaletas (4 com arco de 45^o e 2 de 60^o);

** - 3 canaletas (2 com arco de 45^o e 1 de 60^o);

PR- Protótipo confeccionado por prototipagem rápida.

Para os espaçamentos de 2 m x 2 m e 2,5 m x 2,5 m, a grande maioria dos protótipos apresentaram valores de CUC satisfatórios, entretanto, para os maiores espaçamentos, só alguns protótipos apresentaram uniformidades satisfatórias. Esses dados corroboram com Wilcox e

Swailles (1947), que afirmam que curvas irregulares provêm boa uniformidade de distribuição somente para certos espaçamentos, porém não são dignos de confiança para uma boa representação. Nos menores espaçamentos o custo de implantação do sistema de irrigação deverá ficar alto, sendo mais recomendado optar pelos protótipos que permitam trabalhar em espaçamentos maiores.

Os modelos de protótipos considerados regulares ou ruins (CUC abaixo de 80%), e que são inadequados para irrigar culturas que exijam sobreposição dos jatos de água, podem ser utilizados em irrigação de fruteiras onde o microaspersor trabalha isoladamente, sem necessidade de sobreposição.

A utilização dos defletores não surtiu o efeito esperado, pois os valores de CUC e CUD nos protótipos com os defletores foram menores em todos os casos, devido possivelmente a maior irregularidade dos perfis de distribuição de água nesses protótipos, com concentração excessiva em determinados pontos do raio molhado. Isto ocorreu em função do não dimensionamento correto desses defletores.

Para todos os protótipos avaliados, ocorreu um decréscimo da uniformidade de distribuição com o aumento do espaçamento (Tabela 4). Tal comportamento, já esperado e encontrado por outros autores, pode ser explicado pelo fato de que a maior disposição entre os microaspersores provoca redução na sobreposição da precipitação, tornando o perfil de distribuição mais irregular, com conseqüente diminuição do CUC e CUD.

Como era de se esperar também, os valores das lâminas médias decresceram com o aumento dos espaçamentos. Para os espaçamentos de 2 m x 2 m, 2,5 m x 2,5 m, 3 m x 3 m, 3,5 m x 3,5 m e 4 m x 4 m, as lâminas médias foram de 45 mm h⁻¹, 28,8 mm h⁻¹, 20 mm h⁻¹, 14,7 mm h⁻¹ e 11 mm h⁻¹. A explicação do decréscimo da lâmina média e sua variação são dadas exclusivamente pela variação do aumento do espaçamento dos microaspersores. Apenas os espaçamentos maiores que 3 m x 3 m apresentam lâminas médias adequadas as taxas de infiltração da maioria dos solos agrícolas.

Pela análise dos dados, observou-se que o CUD foi o coeficiente mais rigoroso, ou seja, foi o coeficiente que demonstrou as maiores desuniformidades de aplicação da água, sendo mais sensível aos valores extremos que o CUC, o que pode ser verificado pelos valores mais baixos desse coeficiente. Entretanto, diversos trabalhos concluíram que existe uma relação linear entre o

CUC e o CUD (KELLER; BRIESNER, 1990; TARJUELO et al., 1999). Tendo sido apresentado algumas equações de estimativa do CUC em função do CUD.

$$\text{CUC} = 0,60 \text{ CUD} + 40 \quad (10)$$

Como os microaspersores estão sendo desenvolvidos para irrigar hortaliças, que apresentam alto rendimento econômico e sistema radicular raso, eles devem atender também as recomendações de Frizzone (1992), na qual o sistema deve apresentar alta eficiência, com valores de CUC acima de 85% e CUD maiores que 80%. Nesse caso, apenas os protótipos de 6 canaletas e 35° no espaçamento de 3 m x 3 m atendem a esse requisito. Sendo assim, esses dois protótipos atendem o objetivo do projeto de desenvolver um microaspersor com boa uniformidade para irrigar hortaliças.

A Figura 22 apresenta o diagrama pluviométrico e as isoietas, dos protótipos de 6 canaletas com 35°, simulados em espaçamento de 3 m x 3 m. Observa-se uma distribuição uniforme na área irrigada, porém com uma certa concentração no centro da área irrigada. Estes dados confirmam o bom perfil de distribuição de água apresentado por estes protótipos quando operando isoladamente.

Figura 22 - Diagrama pluviométrico dos protótipos de 6 canaletas com 35° no espaçamento de 3 m x 3 m

Figura 23 - Diagrama pluviométrico do protótipo de 6 canaletas com 35° e duas canaletas diferenciadas no espaçamento de 4 m x 4 m

Figura 24 - Diagrama pluviométrico dos protótipos com 27° no espaçamento de 4 m x 4 m

O protótipo de 6 canaletas com 35° e duas canaletas diferenciadas foi o único que apresentou sobreposição adequada para o espaçamento de 4 m x 4 m (Figura 23). Observa-se que, ao contrário da distribuição no espaçamento de 3 m x 3 m, as maiores precipitações ocorreram mais próximas aos emissores.

A combinação nos maiores espaçamentos para os protótipos de 27° forneceu uma distribuição de água bastante irregular, porque a sobreposição não foi adequada (Figura 24) ficando algumas partes da área irrigada com baixa ou nenhuma precipitação, principalmente na área central.

2.8.10 Adaptação dos microtubos aos microaspersores comerciais

A relação pressão versus comprimento de microtubo é mostrada na Tabela 5. Os dados experimentais foram correlacionados, obtendo uma função linear.

$$L = aH + b \quad (11)$$

Onde L é o comprimento do microtubo; H é a pressão de operação (kPa); a e b são os coeficientes de regressão.

As equações de regressões da relação pressão disponível versus comprimento de microtubo, apresentaram altos coeficientes de determinação ($R^2 > 0,97$). Sendo que para cada modelo de microaspersor nas condições especificadas existe uma equação, na realidade para cada vazão existe uma equação, já que um mesmo modelo pode trabalhar em uma faixa de vazão. A vazão nos quatro modelos testados varia de 40 a 70 L h⁻¹, portanto essas equações podem ser extrapoladas para vários outros modelos e marcas de microaspersores, desde que utilize a equação desenvolvida para cada vazão, para calcular os comprimentos de microtubos.

Tabela 5 - Equação comprimento do microtubo versus pressão determinada experimentalmente

Modelo	Vazão (L/h)	Equação	R ²
A1	40	$L = 0,2920H - 10,316$	0,9994
A2	50	$L = 0,2003H - 10,932$	0,9976
B	60	$L = 0,1362H - 8,9376$	0,9912
C	70	$L = 0,1205H - 15,522$	0,9735

Uma comparação entre a pressão calculada pela equação de Darcy-Weisbach e a de Blasius foi utilizada para avaliar a melhor estimativa em relação à pressão observada. A relação entre a pressão observada e a estimada mostrou uma boa correlação, com baixa variabilidade,

comprovando a adequacidade das expressões obtidas. O coeficiente de determinação foi superior a 0,96, demonstrando um ótimo ajuste dos dados observados. Portanto, o modelo utilizado fornece uma boa estimativa da relação comprimento do microtubo versus pressão de operação (Figura 25). Apenas o modelo C apresenta os dados um pouco dispersos.

Figura 25 - Comparação entre a pressão estimada e a pressão observada para os quatro modelos de microaspersores adaptados ao microtubo

O perfil tipo II-a ocorre quando a linha lateral é montada em situação de declive, onde o ganho de energia em função da diferença de nível é maior que a energia da perda de carga, mas a pressão no final da linha lateral é menor que a pressão no início. A pressão mínima ao longo da linha lateral ocorre entre o meio e o fim da linha (GILLESPIE et al., 1979). Para todos os modelos de microaspersores testados, este foi o tipo de perfil (Figura 26).

Figura 26 - Gradiente de pressão estimado ao longo da linha lateral

Os valores de comprimento da linha lateral foram de 68 m, 58 m, 50 m e 40 m com emissores espaçados a cada 2 m, para os modelos A1, A2, B e C, respectivamente (Figura 26). Esses valores de comprimento máximo e número de emissores por linha lateral são similares aos relatados por Boman (2007) para vazões parecidas de forma a obter variação máxima na vazão de aproximadamente 5%. Observa-se também que quanto maior a vazão dos microaspersores, menor será o comprimento da linha lateral.

Tabela 6 - Resultados experimentais das pressões, vazão e os coeficientes de uniformidade de vazão ao longo da linha lateral

Modelo	Pressão entrada	Pressão final	$Q_{(média)}$	Escala Vazão	CVq	Us	CUD
	kPa		$(L\ h^{-1})$			%	
A1	245	74	38	37-40	1,6	98	98
A2	245	92	48	46-51	2,2	98	97
B	245	101	58	54-61	3,7	96	94
C	245	144	70	62-76	5,5	94	93

A variação de pressão permitida na linha lateral com a adaptação dos microtubos aos microaspersores comerciais foi inversamente proporcional à vazão do emissor. Nos emissores com vazão de $40\ L\ h^{-1}$, $50\ L\ h^{-1}$, $60\ L\ h^{-1}$ e $70\ L\ h^{-1}$ a variação de pressão permitida foi de 170 kPa, 152 kPa, 149 kPa e 96 Kpa, respectivamente (Tabela 6). Isto pode ser explicado pelo fato de que emissores com maiores vazões requerem maiores pressões para manter a vazão alta. Estas faixas de variação de pressão estão dentro dos valores recomendados por Kang (2000), onde a amplitude de pressão máxima permitida entre a pressão máxima e a mínima em uma linha lateral deve ser menor que 200 kPa. Com a utilização de emissores de maiores vazões, diminui-se o comprimento da linha lateral e o número de emissores por linha lateral. Essa menor amplitude de pressão limita o comprimento da linha lateral.

Verifica-se que, para os modelos de microaspersores A1, A2 e B, as vazões observadas foram 5%, 4% e 3% menores do que os valores calculados ($40\ L\ h^{-1}$, $50\ L\ h^{-1}$ e $60\ L\ h^{-1}$), respectivamente, o que pode ser atribuída a perdas de carga não computada nos cálculos. Os Emissores A1 e A2 apresentaram coeficiente de variação da vazão (CVq) menor que 2,2%,

enquanto o emissor B foi de 3,7% e o emissor C foi de 5,5%. Todos os emissores apresentaram valores variação de vazão abaixo do máximo permitido (10%) em linhas laterais de sistemas de irrigação localizada. Esses valores são parecidos aos encontrados por Bucks e Myers (1973); Souza (2005), que encontraram variações de vazões variando de 1,8% a 2,5% em sistemas de irrigação utilizando microtubos, com diâmetros de 1,0 mm, 1,5 mm e 2 mm em vários comprimentos de microtubos. Li, Meng e Li (2007) também encontraram baixos valores de variação de vazão ($< 5\%$), porém em emissores autocompensantes.

Em um experimento prévio, sob as mesmas condições, entretanto, desconsiderando a perda de carga localizada devida à inserção dos conectores dos emissores, verificou-se uma tendência de diminuição gradual da vazão ao longo da linha lateral, mas os valores de uniformidades de vazão foram altos. Comprovando a necessidade de computar todas as perdas de carga, para que a vazão observada seja a mais próxima possível da calculada.

Considerando o resultado geral, a uniformidade estatística e a de distribuição foram classificadas como excelente ($> 90\%$) pela classificação de Bralts (1986). A uniformidade de distribuição da vazão para os emissores avaliados pelos coeficientes CUD e U_s , apresentaram valores maiores que 90%, caracterizando a boa uniformidade de distribuição mantida pelo microtubo, mantendo perfeitamente constante a vazão do emissor ao longo da linha lateral.

Figura 27 - Distribuição da vazão dos emissores ao longo da linha lateral

Um padrão similar de variação foi observado para os emissores A1 e A2 na vazão aplicada ao longo da linha lateral, enquanto ocorreu uma maior variação para os outros dois emissores, sendo que o emissor C apresentou uma maior variação (Figura 27). Embora tenham ocorrido essas variações nas vazões destes emissores, verifica-se que elas não seguiram uma tendência de redução com o aumento do comprimento, e sim, ocorreu aleatoriamente. Esta característica é típica de emissores autocompensantes. Pois Li, Meng e Li (2007), ao avaliar variações de vazões em emissores autocompensantes ao longo de uma linha lateral com comprimento de 70 m, observaram que ela ocorria de forma aleatória. Por outro lado, os mesmos autores observaram que a aplicação de água nos emissores convencionais mostrou uma tendência de redução com o aumento do comprimento da linha lateral.

Os resultados encontrados neste trabalho corroboram com trabalhos de Kenworthy (1972); Bucks e Myers (1973); Souza e Botrel (2004) trabalhando com gotejamento e Almeida et al. (2008) trabalhando com microaspersão, que concluíram que excelentes uniformidades de aplicação de água podem ser obtidos com a utilização de microtubos como dispositivos reguladores de vazão dos emissores ao longo de uma linha lateral em sistemas de irrigação localizada. Sendo que, com este trabalho conclui-se que a técnica pode ser utilizada em sistemas de microaspersão comerciais, a serem instalados ou já em funcionamento nas propriedades rurais.

O microaspersor modelo B apresenta diagrama pluviométrico característico dos microaspersores (Figura 28), com a precipitação distribuída ao longo do raio molhado, mas com um pico a 2 m. Já o microaspersor C apresenta uma distribuição muito irregular na área molhada, com concentração mais de um lado da área (Figura 29). Os dois modelos são adequados para trabalhar isoladamente, irrigação de fruteiras. Em condições de sobreposição dos jatos a uniformidade é baixa ($CUC < 70\%$ para espaçamento de 3 m x 3 m).

Figura 28 - Diagrama Pluviométrico do microaspersor modelo B

Figura 29 - Diagrama Pluviométrico do microaspersor modelo C

2.9 Considerações finais

O PVC e o technyl, dentre os materiais estudados, são os mais apropriados para o desenvolvimento de protótipos de microaspersores através do torneamento mecânico;

O processo de usinagem no torno mecânico permite desenvolver protótipos de microaspersores;

O processo de prototipagem rápida é um excelente mecanismo para desenvolvimento de protótipos de microaspersores, porém só deve ser utilizado nas etapas finais de desenvolvimento, uma vez que seu custo ainda é um pouco alto.

Os ajustes realizados nos protótipos iniciais que não funcionaram contribuíram significativamente para que o protótipo desenvolvido alcançasse resultados positivos;

Os protótipos desenvolvidos deverão ser testados em condições injetadas, pois com a injeção do protótipo ocorrem mudanças em suas características físicas;

Trabalhos futuros deverão determinar os limites de vazão permitida por emissor para trabalhos com microtubos em microaspersão.

O grupo de pesquisa em hidráulica da ESALQ-USP deve continuar firme no estudos de utilização da tecnologia de microtubos nos sistemas de irrigação localizada, no intuito de torná-la cada vez mais viável e acessível aos produtores rurais.

O trabalho de desenvolvimento de produtos exige o envolvimento de pesquisadores com formação multidisciplinar, de modo a ocorrer um sinergismo das diversas áreas envolvidas. Para tanto, o departamento de Engenharia Rural da ESALQ-USP, deve estreitar suas relações com outras unidades da USP, bem como outras Universidades (UNICAMP) e institutos de tecnologia a exemplo do CenPRA.

3 CONCLUSÕES

A geometria das bailarinas, ângulo e número de canaletas afetaram o desempenho do modelo, sendo que os de maiores ângulos apresentaram uniformidade de distribuição de água mais satisfatórias quando sobrepostos.

A utilização da técnica de microtubos de comprimento variável se adapta a microaspersores convencionais, uniformizando a vazão ao longo da linha lateral.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C.D.G.C. **Microaspersor com microtubos**: um novo conceito hidráulico na irrigação localizada. 2008. 100p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- ALMEIDA, C.D.G.C.; BOTREL, T.A.; SMITH, R.J. Characterization of the microtube emitters used in a novel micro-sprinkler. **Irrigation Science**, Berlin, DOI 10.1007/soo271-008-0135-y, 2008.
- 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. 1997.
- BEALE, J.G.; HOWEL, D.T. Relationship among sprinkler uniformity measures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.92, n. IR1, p. 41-48, Mar.1966.
- BENAMI, A.; HORE, F.R. A new irrigation sprinkler distribution coefficient. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.7, n.2, p. 157-158, 1964.
- BILANSKI, W.K; KIDDER, E.H. Factors that affect the distribution of water from a medium-pressure rotary irrigation sprinkler. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.1, n.1, p.19-29, 1958.
- BOMAN, B.J. Distribution patterns of microirrigation spinner and spray emitters. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.5, n.1, p.50-56, 1989.
- BOMAN, J.B.; PARSONS, L.R. Microsprinkler experiences in Florida citrus. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.15, n.5, p.465-475, 1999.
- BOMAN, B.J. Microsprinkler irrigation. In: LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production**: design, operation, and management. Amsterdam: Elsevier, 2007. chap. 15, p. 515-606.
- BOTREL, T.A **Hidráulica de microaspersores e de linhas laterais para irrigação localizada**. 1984.78p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.
- BRALTS, V.F.; Wu, I.P.; GITLIN, H.M. Manufacturing variation and drip irrigation uniformity. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.1, p. 113-119, Jan./Feb. 1981.
- BRALTS, V.F.; KESNER, C. Drip irrigation field uniformity estimation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.5, p.69-74, 1983.
- BRALTS, V.F. Operation Principles: Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production**: design, operation, and management. Amsterdam: Elsevier, 1986. chap. 3, p. 216-240.

BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation Science**, Berlin, v.1, n.1, p.3-17, 1978.

BUCKS, D.A.; MYERS, L.E. Trickle Irrigation – Application uniformity from simple emitters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 6, n. 6, p.1108-1111, 1973.

BUCKS, D.A.; DAVIS, S. Historical development. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production: design, operation, and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. chap. 1, p.1-26.

BURT, C.M. Rapid field evaluation of drip and microspray distribution uniformity. **Irrigation and drainage systems**, Netherlands, v. 18, n.1, p. 275-297, 2004.

CARDOSO, G.G.G.; FRIZZONE, J.A. Perda de carga em linhas laterais de microirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Campinas, v. 1, n. 2, p. 147-162, maio/ago., 2007.

CLEMMENS, A.J. A statistical analysis of trickle irrigation uniformity. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 30, n. 1, p. 169-175, Jan./Feb, 1987.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkle**. Berkeley: University of California, 1942. 41p (California Agricultural Experimental Station. Buletin, 670.).

CONCEIÇÃO, M.A.F. **Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento**. 2002. 110p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

FRIZZONE, J.A. **Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência**. Piracicaba:ESALQ/USP, 1992. 53p.

HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 42, n.7, p. 354-355, 1961.

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

HOLANDA FILHO, R.S.F.; PORTO FILHO, F.Q.; MIRANDA, N.O.; MEDEIROS, J.F. Caracterização hidráulica do microaspersor, da Plastro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.465–473, 2001.

HOWEL, D.T. Non-uniformity and sprinkler application efficiency. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 90, n. IR3, p. 41-53, Sept. 1964.

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.

GORNI, A.A. A técnica da prototipagem rápida. **Revista Plástico industrial**. São Paulo, v. 3, n. 2, p. 230-239, mar. 2001.

GORNI, A.A. Introdução à prototipagem rápida e seus processos. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/protrap.html>>. Acesso em: 20 set. 2008.

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, 2002.

LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 2007. 618p.

LI, J.; MENG, Y.; LI, B. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injection type and manufacturing variability of emitters. **Irrigation Science**, Berlin, v.25, n.2, p.117-125, 2007.

LINO, F.J.; NETO, R.J.L.; VASCONCELOS, M.T.; VASCONCELOS, P.V.; PEREIRA, A.V E SILVA, C.E. Diluição de fronteiras entre o design e a indústria através da prototipagem rápida – um caso de estudo. **Cadernos Empresariais**, Porto, Pt v.1, n. 7, p. 58-63, 2000.

KANG, Y. Effect of operating pressures on microirrigation uniformity. **Irrigation Science**. Amsterdam, v.20, n.1, p.23-27, 2000.

KHATRI, K.C.; WU, I.; GILTLIN, 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.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 625 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.17, n.4, p.678-84, 1974.

KENWORTHY, A.L. **Trickle irrigation** – The concept and guidelines for use Lansing: Agricultural Experiment Station Michigan State University, May, 1972. (Research report, 165) (Farm Science).

MYERS, L.E.; BUCKS, D.A. Uniformity irrigation with low-pressure trickle systems. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.98, n. IR3, p.341-346, 1972.

MATOS, J.A.; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, C.V.A. Características hidráulicas do microaspersor Dan Sprinkler 2001. **Irriga**, Botucatu, v.1, n.3, p.30-44, 1996.

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

MIETTI, M.A; VENDRAMETO, O. Uso da prototipagem rápida como fator de competitividade. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 20., 2000, São Paulo. **Resumos...**São Paulo:POLI-USP, 2000. p. 1.

NASCIMENTO, T.; SOARES, J.M.; AZEVEDO, C.A.V. Caracterização hidráulica do microaspersor Rain-Bird QN-14. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.1, p.30-33, 1999.

NICOLSKY, R. **Os desafios para transformar conhecimento em valor econômico**. Disponível em: [http //WWW.ciencia.com.br/](http://WWW.ciencia.com.br/). Acesso em: 15 dez. 2007.

NOGUEIRA, A.M. **Características hidráulicas e de distribuição de água por microaspersores**. 1989. 57p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

NOGUEIRA, C.L.; MARLET, J.M.F., RESENDE, M.C. Processo de obtenção de poliméricos termoplásticos via moldagem por compressão a quente. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v.9, n.2, p.55-63, 1999.

OLIVEIRA, R.V.B.; PINHEIRO, E.A.; SOLDI, V.; PIRES, A.T.N. Moldagem por injeção de pós cerâmicos: Remoção da parafina e do polipropileno utilizado como veículo orgânico. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v.14, n.3, p.110-115, 2004.

PAIR, C.H Water distribution under sprinkler irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n.5, p. 648-651, 1968.

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

RODRIGUES, L.N.; MELLO, J.P.L.; MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M. Coeficientes de uniformidade: sensibilidade a mudanças nos fatores operacionais. **Irriga**, Botucatu, v.2, n.2, p.90-99, 1997.

RODRÍGUEZ-SINOBAS, L.; JUANA, L.; LOSADA, A. Effects of temperature changes on emitter discharge. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 125, n. 2, p. 64-73, Mar.-Apr. 1999

SAMPAIO, S.C.; VILELA, L.A.A.; DIAS, J.A.A.; FARIAS, M.A.de. Características hidráulicas e da distribuição do microaspersor NAAN 7110. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.20, n.1, p.70-78, 1996.

SEGINER, I. Water distribution from médium pressure sprinkler. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 89, n. IR2, p. 13-28, June 1963.

SOUZA, R.R.M.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p.16-22, 2004.

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

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.

TARJUELO, J.M; MONTERO, J.; VALIENTE, M.; HONRUBIA, F.T., ORTIZ, J. Irrigation uniformity with medium size sprinkler part 1: characterization of water distribution in no-wind conditions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.42, n.3, p. 665-675, 1999.

VON BERNUTH, R.D.; SOLOMON, K.H. Design principles: Emitter construction. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production: design, operation, and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. chap. 1, p. 27-45.

VON 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.

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.; 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.

WU, I.; BARRAGAN, J.; BRALTS, V.F. Field performance and Evaluation. In: LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production: design, operation, and management**. Amsterdam: Elsevier, 2007. chap. 10, p. 357-386.

ANEXOS

Diagramas pluviométricos de distribuição de água dos protótipos de microaspersores

Figura 30 - Diagrama Pluviométrico dos protótipos de microaspor com 3 canaletas

27^0

 27^0 e 1 defletor

 35^0

 35^0 e 1 defletor

Figura 31 - Diagramas Pluviométricos dos protótipos de microaspersor com 4 canaletas

27^0 27^0 e 2 defletores 35^0 35^0 e 2 defletores 35^0 PR (prototipagem rápida) 35^0 com 2 canaleta diferenciada

Figura 32 - Diagramas Pluviométricos dos protótipos de microaspersor com 6 canaletas