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

Modelagem e caracterização hidráulica de microtubos com múltiplas saídas

Dinara Grasiela Alves

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2014**

Dinara Grasiela Alves
Engenheira Agrônoma

Modelagem e caracterização hidráulica de microtubos com múltiplas saídas

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2014**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Alves, Dinara Grasiela

Modelagem e caracterização hidráulica de microtubos com múltiplas saídas /
Dinara Grasiela Alves. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de
2011. - - Piracicaba, 2014.
102 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Inovação tecnológica 2. Simulação hidráulica 3. Baixo custo 4. Emissor
I. Título

CDD 631.7
A474m

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

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos e amados pais, José Lourenço e Adalgisa, pelo imenso apoio, pelos valiosos ensinamentos, pela educação e dedicação em todos os momentos de minha vida.

À minha irmã Gleiciane, pelos incentivos oferecidos em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas bênçãos concedidas em minha vida.

À toda minha família pelo amor, carinho e importante apoio.

Ao meu orientador, professor Dr. Tarlei, pela orientação, amizade, pelos incentivos e importantes ensinamentos.

Aos meus companheiros de trabalho na França: Mathieu, Pascal e Elizabeth. Em especial, à minha co-orientadora Séverine Tomas, a Bruno Molle e a Nassim, pela amizade e importantes contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus companheiros de sala na França: Maite, David, Diawara, Aida, Intissar e Mohammad pelo apoio e amizade.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em especial, ao Departamento de Engenharia de Biosistemas e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pelo acolhimento e pela formação adquirida.

Aos companheiros do Instituto de Energia e Ambiente (IEE/USP): Maria Cristina, Roberto Valer e Prof. Roberto Zilles, pela ajuda oferecida.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ, pelos conhecimentos transmitidos, em especial, aos professores José Antonio Frizzzone e Sergio Nascimento Duarte.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biosistemas, em especial, a Antonio Pires de Camargo e Davilmar pela sua importante ajuda.

Aos funcionários da Biblioteca Central pela atenção e ajuda prestada.

Às minhas amigas Cleucione, Marina, Andreia e Alinne da Silva pelo companheirismo e amizade.

Aos meus companheiros de sala Alexsandro, Conan, Leonardo, Wanderley, Vanessa, Ana Paula, Ezequiel, Gean pela convivência e ajuda.

Ao querido Marinaldo (meu especial agradecimento), pelo seu companheirismo e apoio em tudo, principalmente nos momentos em que mais precisei. É por este e vários outros motivos que o fez ser uma das pessoas mais importantes de minha vida.

Às minhas amigas com quem convivi na vila da graduação da ESALQ da casa 1.

Aos professores da UFRPE Marcus Metri, Ênio Farias, Abelardo Montenegro, Izabel Galindo, José Aécio, Vivian Loges e Maria Betânia, pelos ensinamentos oferecidos e incentivos.

Ao professor Pedro Paulo (IFPE), pelo incentivo e amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche por meio do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE).

Ao Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI), em especial a Marcelo Oliveira pela doação dos protótipos.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

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

Aos amigos Benedito, Márcia, Ceres, Brivaldo, Gilda, Aline Torres, Mércia, Silvana, Paulo Cardoso e Wellington pelo apoio, carinho e pela atenção. São pessoas muito especiais em minha vida.

E a todos que de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe provando o contrário.”

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE SÍMBOLOS.....	21
1 INTRODUÇÃO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Microirrigação.....	25
2.1.1 Emissores para irrigação por gotejamento	27
2.1.2 Uso de microtubos na microirrigação	28
2.1.3 Hidráulica de microtubos	31
2.1.4 Coeficiente de variação de fabricação.....	37
2.1.5 Obstrução de emissores.....	38
2.2 Programa computacional ANSYS Fluent	42
3 MATERIAL E MÉTODOS	45
3.1 Localização e etapas da pesquisa	45
3.2 Descrição do microtubo com múltiplas saídas (MMS).....	45
3.3 Determinação do diâmetro interno dos microtubos	46
3.4 Ensaios preliminares de verificação do modelo de dimensionamento dos microtubos com múltiplas saídas.....	47
3.5 Características hidráulicas de microtubos.....	49
3.5.1 Coeficiente de variação de fabricação dos microtubos com múltiplas saídas	49
3.5.2 Curva vazão-pressão dos microtubos com múltiplas saídas	49
3.5.3 Curva vazão-pressão dos microtubos.....	51
3.5.4 Perda localizada de carga (ΔH_L).....	51
3.5.4.1 Verificação da existência de perda localizada de carga no microtubo com múltiplas saídas	51
3.5.4.2 Verificação da existência de perda localizada de carga nos microtubos.....	51
3.5.5 Determinação do fator de atrito da equação de perda de carga universal.....	53
3.6 Simulação do escoamento d'água no microtubo com múltiplas saídas utilizando o software ANSYS Fluent	53
3.6.1 Criação da geometria.....	53
3.6.2 Criação da malha.....	54

3.6.3	Modelagem	57
3.6.4	Procedimentos realizados para modelagem	57
3.7	Sensibilidade dos microtubos à obstrução por agentes físicos	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	Características hidráulicas de microtubos	60
4.1.1	Coeficiente de variação de fabricação dos microtubos com múltiplas saídas	61
4.1.2	Curva vazão-pressão para microtubos com múltiplas saídas	61
4.1.3	Curva vazão-pressão dos microtubos	62
4.1.4	Análise da perda localizada de carga (ΔH_L)	63
4.1.4.1	Microtubo com múltiplas saídas	63
4.1.4.2	Microtubo	64
4.1.5	Determinação do fator de atrito da equação de perda de carga universal	66
4.2	Simulação do escoamento d'água no microtubo com múltiplas saídas utilizando o software ANSYS Fluent	68
4.2.1	Convergência do modelo para diferentes malhas	68
4.2.2	Avaliação da malha quadrilateral-triangular utilizando o modelo laminar	69
4.2.3	Avaliação da malha utilizando o modelo k- ϵ	71
4.2.3.1	Malha tetraédrica	71
4.2.3.2	Malha quadrilateral-triangular	74
4.2.4	Comparação entre o modelo k- ϵ , modelo laminar e dados experimentais	75
4.2.4.1	Vazão e perda de carga	75
4.2.4.2	Campo de velocidade e linhas de fluxo	76
4.2.4.3	Energia cinética turbulenta (k) e taxa de dissipação (ϵ)	80
4.3	Sensibilidade dos microtubos à obstrução por agentes físicos	82
4.3.1	Microtubos emissores	83
4.3.2	Microtubos reguladores de pressão	84
4.3.3	Microtubos com múltiplas saídas	86
5	CONCLUSÕES	89
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
	REFERÊNCIAS	93
	APÊNDICE	99

RESUMO

Modelagem e caracterização hidráulica de microtubos com múltiplas saídas

A busca por estratégias para otimizar a eficiência de aplicação de água tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores. Neste sentido, destaca-se a utilização de sistemas de microirrigação com microtubos devido ao seu baixo custo e elevada uniformidade de aplicação de água, sendo uma boa alternativa para pequenos agricultores. O emissor utilizado neste trabalho foi denominado “microtubo com múltiplas saídas” (MMS) o qual, por se tratar de uma configuração inovadora, é um tipo de gotejador inexistente no mercado. Este sistema é caracterizado por possuir menor custo em comparação com os sistemas atuais, que utilizam microtubos, tendo em vista a menor quantidade de material necessário à sua implantação. O objetivo deste trabalho foi modelar, determinar as características hidráulicas do microtubo com múltiplas saídas e sua sensibilidade à obstrução por agentes físicos. A condução desta pesquisa dividiu-se em duas etapas. A primeira consistiu na determinação do diâmetro interno dos microtubos, em ensaios preliminares de verificação do modelo de dimensionamento dos MMS e na determinação do coeficiente de variação de fabricação, os quais foram realizados no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, em Piracicaba - SP. A segunda consistiu na determinação das características hidráulicas, na modelagem do escoamento d’água no interior do microtubo com múltiplas saídas e na avaliação da sensibilidade dos microtubos à obstrução por agentes físicos, as quais foram realizadas no Laboratoire d’essais et de recherche des matériels d’irrigation pertencente ao Institut national de recherche en sciences et technologies pour l’environnement et l’agriculture (LERMI/IRSTEA, Aix en Provence, Montpellier, França). A configuração do emissor proposto consiste em um microtubo regulador de pressão (MRP) ligado a um conector com disposição radial de onde derivam seis microtubos emissores (ME). Realizou-se simulações hidráulicas do escoamento nos MMS, utilizando o programa computacional ANSYS Fluent. Determinou-se a sensibilidade à obstrução do MMS e dos microtubos com diâmetro interno de 0,888 e 1,074 mm. O microtubo com múltiplas saídas foi menos sensível à obstrução que os outros microtubos testados, entretanto, o mesmo apresenta áreas críticas quanto à ocorrência de obstrução no interior do conector, principalmente em áreas onde a velocidade da água é próxima ou igual à zero. As diferenças máxima e mínima entre a pressão simulada e a pressão observada experimentalmente foram 13% e 0,2% respectivamente. Desse modo, a simulação não apresentou resultados totalmente satisfatórios em termos de previsão da perda de carga, entretanto, é uma importante ferramenta para identificação de pontos críticos quanto à dissipação da perda de carga e que favorecem a ocorrência de obstrução. Para microtubos, as equações utilizadas no cálculo do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach não apresentaram resultados satisfatórios, contradizendo às recomendações da literatura para tubos convencionais. Uma possível causa dessa discordância é que a definição da faixa do regime de escoamento para microtubos seja diferente dos tubos convencionais, sendo necessária a realização de estudos complementares para se obter resultados mais conclusivos.

Palavras-chave: Inovação tecnológica; Simulação hidráulica; Baixo custo; Emissor

ABSTRACT

Modeling and hydraulic characterization of microtubes with multiple outlets

The search for strategies to optimize the efficiency of water application has been studied by several researchers. In this sense, we highlight the use of microirrigation systems with microtubes due to its low cost and high uniformity of water application, being a good alternative for small farmers. The emitter used in this work was named "microtube with multiple outlets" (MMO) which is a kind of dripper non-existent in the market, because it is an innovative configuration. This system is characterized by having lower cost compared to existing systems that use microtubes, in view of the smaller amount of material required for its implementation. The objective of this work was to model, to determine the hydraulic characteristics of the microtube with multiple outlets and their sensitivity to clogging due physical agents. This research was divided into two stages. The first stage was determining the internal diameter of the microtubes, the lengths of the microtubes and the manufacturing coefficient of variation was conducted in the Hydraulics Laboratory, Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP) in Piracicaba - SP. The second stage was determining the hydraulic characteristics of the microtubes with multiple outlets, to model the flow of water within the microtube with multiple outlets and to evaluate a susceptibility of microtubes to physical agents. This tests were performed at the Laboratoire d'essais et de recherche des matériels d'irrigation belonging to the Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (LERMI/IRSTEA, Aix en Provence, Montpellier, France). The configuration of the proposed system consists of a supply microtube (SM) and six emitter microtubes (EM) that are connected to the supply microtube through a connector. The hydraulic simulations of flow in microtubes with multiple outlets was carried out using the software ANSYS Fluent. It was determined the MMO sensitivity to clogging and of microtubes with internal diameter of 0.888 and 1.074 mm. The microtube with multiple outlets was less sensitive to clogging than other tested microtubes, however, the MMO presents critical areas to occurrence of clogging within the connector, especially in areas where the water velocity is close or equal to zero. The maximum and minimum difference between the simulated pressure and experimentally observed pressure was 13% and 0.2 % respectively. The simulation did not provide fully satisfactory results in terms of predicting the head loss, however, it is an important tool to identify critical points of head loss and of critical points that favors the occurrence of clogging. For microtubes, the equations used to calculate the Darcy- Weisbach equation friction factor showed no satisfactory results, contradicting the recommendations from the literature for conventional tubes. One possible cause of this discrepancy is that the definition of the flow regime for microtubes is different from conventional tubes. More studies must be conducted to obtain more conclusive results are required.

Keywords: Technology innovation; Hydraulic simulation; Low cost

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de microirrigação. A - gotejamento; B - microaspersão	25
Figura 2 - Vista de alguns tipos de tubos emissores.....	28
Figura 3 - Sistema de microirrigação utilizando microtubos	30
Figura 4 - Esquema do sistema de irrigação com ultra baixa vazão utilizando microtubos ramificados	31
Figura 5 - Comparação entre emissores obstruídos (A e C) e simulação hidráulica (B e D) utilizando o programa computacional ANSYS Fluent.....	43
Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos para modelagem utilizando o programa computacional ANSYS Fluent	44
Figura 7 - Esquema do microtubo com múltiplas saídas.....	46
Figura 8 - Conector: A - vista inferior; B - vista superior; C - vista lateral; D - vista em perspectiva.....	46
Figura 9 - Esquema da bancada de ensaio.....	50
Figura 10 – Detalhes da ligação do conector ao piezômetro. A - adaptador para leitura da pressão no conetor; B - microtubo inserido no adaptador; C - conexão do microtubo ao tubo de diâmetro maior; D - piezômetros	50
Figura 11 - Esquema do ensaio realizado para determinação da perda localizada de carga no microtubo.....	52
Figura 12 - Geometria em 3D do trajeto de escoamento d'água no interior do microtubo com múltiplas saídas. A - vista em perspectiva, B - vista superior	54
Figura 13 - Malha do tipo tetraédrica no conector do microtubo com múltiplas saídas com tamanho máximo de $1,5 \times 10^{-4}$ m	55
Figura 14 - Linhas traçadas para visualização do perfil de velocidade no conector e nos microtubos emissores	57
Figura 15 - Bancada de testes de obstrução dos emissores	59
Figura 16 - Curva vazão versus pressão de entrada no microtubo com múltiplas saídas utilizando microtubo regulador de pressão de 0,742 m de comprimento.....	62
Figura 17 - Curva vazão versus pressão de entrada no microtubo com múltiplas saídas utilizando microtubo regulador de pressão de 0,542 m de comprimento.....	62
Figura 18 - Curva vazão versus pressão para microtubo com diâmetro interno de 1,074 mm e comprimentos de 1; 0,5 e 0,25 m	63
Figura 19 - Curva vazão versus pressão para microtubo com diâmetro interno de 0,888 mm e	

comprimentos de 1; 0,5 e 0,25 m.....	63
Figura 20 - Diferença entre a perda de carga total e a perda distribuída de carga (ΔH_L) no microtubo com múltiplas saídas utilizando microtubo regulador de pressão com 0,742 e 0,542 m de comprimento	64
Figura 21 - Perda de carga total nos microtubos (com comprimentos de 0,742 m e 0,542 m e diâmetro interno de 1,074 mm) e perda de carga distribuída calculada pela equação de Darcy-Weisbach.....	65
Figura 22 - Diferença entre a perda de carga total e a perda de carga distribuída (ΔH_L) nos microtubos com comprimento de 0,742 e 0,542 m e diâmetro interno de 1,074 mm	66
Figura 23 - Perda de carga unitária (J) em função do número de Reynolds (Re) em microtubo com diâmetro de 1,074 mm. L: Laminar (Hagen-Poiseuille); PL: Prandtl; SW: Swamee (1993); EXP: Experimental.....	67
Figura 24 - Perda de carga unitária (J) em função do número de Reynolds (Re) em microtubo com diâmetro de 0,888 mm. L: Laminar (Hagen-Poiseuille); PL: Prandtl; SW: Swamee (1993); EXP: Experimental.....	67
Figura 25 - Resíduos das equações de movimento em função do número de iterações	69
Figura 26 - Perfil de velocidade da água na parte inferior (inf) e superior (sup) no conector para a vazão de 2,46 L h ⁻¹ . A - utilizando malha máxima de 0,5 x 10 ⁻⁴ m e 1,5 x 10 ⁻⁴ m; B - 0,5 x 10 ⁻⁴ m e 2,0 x 10 ⁻⁴ m	70
Figura 27 - Perfil de velocidade na parte central do conector para a vazão de 2,46 L h ⁻¹ . A - utilizando malha máxima de 0,5 x 10 ⁻⁴ m e 1,5 x 10 ⁻⁴ m; B - 0,5 x 10 ⁻⁴ m e 2,0 x 10 ⁻⁴ m.....	70
Figura 28 - Simetria do perfil de velocidade para vazão de 2,46 L h ⁻¹ . A - nas seis saídas do conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção entre o conector e o microtubo emissor (INT) utilizando malha máxima de 0,5 x 10 ⁻⁴ m.....	71
Figura 29 - Perfil de velocidade da água na parte inferior (inf) e superior (sup) do conector para vazão de 6 L h ⁻¹ . A - utilizando malha com refinamento de 1,5 x 10 ⁻⁴ m e 2,0 x 10 ⁻⁴ m; B - 1,5 x 10 ⁻⁴ e 2,5 x 10 ⁻⁴ m; C - 1,5 x 10 ⁻⁴ m e 3,0 x 10 ⁻⁴ m (C)	72
Figura 30 - Perfil de velocidade da água na parte central do conector para vazão de 6 L h ⁻¹ . A - utilizando malha com refinamento de 1,5 x 10 ⁻⁴ m e 2,0 x 10 ⁻⁴ m; B - 1,5 x 10 ⁻⁴ m e 2,5 x 10 ⁻⁴ m; C - 1,5 x 10 ⁻⁴ m e 3,0 x 10 ⁻⁴ m.....	72
Figura 31 - Simetria do perfil de velocidade para vazão de 6,0 L h ⁻¹ . A - nas seis saídas do conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção entre o conector e o microtubo (INT) utilizando malha com refinamento de 1,5 x 10 ⁻⁴ m.....	73
Figura 32 - Simetria do perfil de velocidade para vazão de 2,46 L h ⁻¹ . A - nas seis saídas do	

conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção entre o conector e o microtubo (INT) utilizando malha com refinamento de $1,5 \times 10^{-4}$ m	73
Figura 33 – Simetria do perfil de velocidade para vazão de $6,0 \text{ L h}^{-1}$. A - nas seis saídas do conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção (INT) entre o conector e os microtubos emissores utilizando malha de $0,5 \times 10^{-4}$ m	74
Figura 34 – Simetria do perfil de velocidade para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - nas seis saídas do conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção (INT) entre o conector e os microtubos emissores utilizando malha de $0,5 \times 10^{-4}$ m	75
Figura 35 - Curva vazão versus perda de carga no microtubo com múltiplas saídas. EXP: dados experimentais; k-ε: simulação Fluent modelo k-ε; laminar: simulação Fluent modelo laminar que convergiu apenas para vazões de $2,46$ e $3,07 \text{ L h}^{-1}$	76
Figura 36 - Campo de velocidade (m s^{-1}) obtido pelo modelo k-ε para vazão de 6 L h^{-1} . A - plano horizontal; B - plano vertical	77
Figura 37 - Campo de velocidade (m s^{-1}) obtido pelo modelo k-ε para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - plano horizontal; B - plano vertical	77
Figura 38 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo k-ε para vazão de 6 L h^{-1} . A - localizadas a $0,25 \text{ mm}$ da base do conector; B - localizadas a $2,25 \text{ mm}$ da base do conector; C - localizadas a $1,25 \text{ mm}$ da base do conector. A escala de cores representa o valor da velocidade	78
Figura 39 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo k-ε para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - localizadas a $0,25 \text{ mm}$ da base do conector; B - localizadas a $2,25 \text{ mm}$ da base do conector; C - localizadas a $1,25 \text{ mm}$ da base do conector. A escala de cores representa o valor da velocidade	79
Figura 40 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo k-ε no plano vertical do conector e vazão de 6 L h^{-1} . A - plano zy; B - plano xz. A escala de cores representa o valor da velocidade	79
Figura 41 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo k-ε no plano vertical do conector e vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - plano zy; B - plano xz. A escala de cores representa o valor da velocidade	80
Figura 42 - Campo de energia cinética turbulenta (k) ($\text{m}^2 \text{ s}^2$) obtido pelo modelo k-ε. A - plano horizontal; B - plano vertical. Taxa de dissipação (ε) ($\text{m}^2 \text{ s}^3$), C - plano horizontal, D - plano vertical para vazão de 6 L h^{-1}	81
Figura 43 - Campo de energia cinética turbulenta (k) ($\text{m}^2 \text{ s}^2$) obtido pelo modelo k-ε. A - plano horizontal; B - plano vertical. Taxa de dissipação (ε) ($\text{m}^2 \text{ s}^3$), C - plano horizontal, D - plano vertical para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$	82
Figura 44 - Vazão relativa dos microtubos emissores ao longo do tempo, com o aumento de concentração e diâmetro de partículas de areia na verificação da sensibilidade à obstrução...	83

Figura 45 - Microtubo emissor obstruído. A - entrada do microtubo emissor; B - saída do microtubo emissor.....	84
Figura 46 - Vazão relativa dos microtubos reguladores de pressão ao longo do tempo, com o aumento de concentração e diâmetro de partículas de areia na verificação da sensibilidade à obstrução	85
Figura 47 - Microtubo regulador de pressão obstruído. A - entrada do microtubo regulador de pressão; B - saída do microtubo regulador de pressão.....	85
Figura 48 - Vazão relativa dos microtubos com múltiplas saídas ao longo do tempo, com o aumento de concentração e diâmetro de partículas de areia na verificação da sensibilidade à obstrução	86
Figura 49 – Detalhes dos conectores obstruídos: Imagens obtidas com microscópio eletrônico (A, B e C), imagens obtidas com câmera digital comum (D e E).....	87
Figura 50 - Interior do microtubo	88
Figura 51 - Campo de velocidade (m s^{-1}) obtido pelo modelo laminar para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - plano horizontal; B - plano vertical	101
Figura 52 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo laminar para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - localizadas a 0,25 mm da base do conector; B - localizadas a 2,25 mm da base do conector; C - localizadas a 1,25 mm da base do conector. A escala de cores representa o valor da velocidade	101
Figura 53 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo laminar no plano vertical do conector e vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - entrada do conector; B - parte basal do conector. A escala de cores representa o valor da velocidade.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas dos microtubos.....	29
Tabela 2 - Valores dos coeficientes “a”, “b”, “c” e “d” da fórmula proposta por Vermeiren e Jobling (1997) para cálculo da vazão de um microtubo.....	34
Tabela 3 - Valores de diâmetro interno, “a”, “b” e coeficiente de determinação do ajuste.....	34
Tabela 4 - Classificação dos emissores quanto ao coeficiente de variação de fabricação	38
Tabela 5 - Principais agentes físicos, químicos e biológicos que provocam obstruções nos sistemas de microirrigação	39
Tabela 6 - Critérios para classificação do potencial de risco de águas no entupimento de sistemas de microirrigação	40
Tabela 7 - Sensibilidade dos emissores ao entupimento em função do diâmetro interno	41
Tabela 8 - Parâmetros utilizados para determinação do comprimento do microtubo emissor e do microtubo regulador de pressão.....	48
Tabela 9 - Características das malhas testadas	56
Tabela 10 - Dados experimentais obtidos nos ensaios sob diferentes pressões	58
Tabela 11 - Convergência do modelo em função do tipo de malha	69
Tabela 12 - Vazão em cada microtubo e vazão média do microtubo emissor (ME), microtubo regulador de pressão (MRP) e microtubo com múltiplas saídas (MMS) em ensaio realizado com água limpa.....	82

LISTA DE SÍMBOLOS

a, b, c e d - coeficientes de ajuste
 CV_f - coeficiente de variação de fabricação
 D - diâmetro interno do microtubo
 e^* - rugosidade absoluta da parede do microtubo
 E_c - espaçamento entre microtubos conectores
 EV - energia de velocidade
 f - fator de atrito
 g - aceleração da gravidade
 h_f - perda contínua de carga no microtubo
 h_{f_c} - perda de carga no microtubo conector
 $h_{f_{i-1}}$ - perda de carga no trecho “i-1”
 $h_{f_{total}}$ - perda de carga total
 ΔH_L - perda localizada de carga
 I - declividade no terreno
 i - posição do microtubo conector ao longo da linha lateral
 J - perda de carga unitária do microtubo
 k - coeficiente de perda localizada de carga
 K_p - coeficiente de proporcionalidade
 L - comprimento do microtubo
 L_c - comprimento do microtubo conector
 LL - linha lateral
 m - expoente de fluxo do emissor
 MRP - microtubo regulador de pressão
 ME - microtubo emissor
 MMS - microtubo com múltiplas saídas
 MMS_c - microtubo com múltiplas saídas completo
 MMS_s - microtubo com múltiplas saídas simulado
 n - expoente do diâmetro do microtubo
 P_{co} - pressão na parte central do conector observada
 P_e - pressão na entrada do microtubo conector
 P_{ei} - pressão na entrada do microtubo conector no iésimo ponto (i) ao longo da linha lateral

P_{ei-1} - pressão no ponto anterior ao ponto “i”

$P_{st_{calc}}$ - Pressão no segmento de tubo calculada

$P_{st_{obs}}$ - pressão no segmento de tubo de derivação observada

$\frac{P}{\gamma}$ - carga de pressão

ΔP_{ME} - diferença de pressão entre a entrada e a saída do microtubo emissor com comprimento de 0,564 m

ΔP_{MMSc} - diferença de pressão entre a entrada e a saída do microtubo com múltiplas saídas completo

ΔP_{MMSS} - diferença de pressão entre a entrada e as saídas do microtubo com múltiplas saídas simulado

ΔP_{MRP} - diferença de pressão entre a entrada e a saída do microtubo regulador de pressão com comprimento de 0,502 m

Q - vazão do microtubo

Re - número de Reynolds

SC - saída do conector

V - velocidade da água no microtubo

$\frac{V^2}{2g}$ - carga cinética

μ - viscosidade cinemática da água

Z - carga de posição

1 INTRODUÇÃO

A busca por estratégias para otimizar a eficiência de aplicação de água tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores. A irrigação se caracteriza como uma tecnologia que está frequentemente apresentando inovações, capazes de assegurar elevados níveis de desempenho dos sistemas, nas mais adversas e diversas condições. Isso é proveniente das pesquisas, as quais promovem o desenvolvimento da ciência de irrigação, numa procura constante do melhor resultado aliado ao menor custo.

A utilização de sistemas de microirrigação com microtubos destaca-se como uma boa alternativa para pequenos agricultores. O microtubo, também chamado de espaguete, é um gotejador de longo percurso e de baixo custo, feito de polietileno de pequeno diâmetro (0,5 a 1,5 mm), cujo comprimento pode ser ajustado de acordo com a pressão no ponto de inserção do microtubo na linha lateral. Com isso, o interesse por microtubos vem aumentando, principalmente por entidades que prestam assistência técnica a pequenos produtores e comunidades carentes.

A maioria desses agricultores trabalham com agricultura familiar, a qual é responsável por garantir boa parte do suprimento de alimentos, caracterizando-se como importante fornecedora de alimentos para o mercado interno brasileiro (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2006). Em geral, esses agricultores são de baixa renda, e por consequência, apresentam baixa capacidade de adoção de tecnologias em irrigação.

O grupo de pesquisa em hidráulica da ESALQ/USP vem estudando de forma mais sistemática o uso dessa tecnologia. Inicialmente, Souza e Botrel (2004) desenvolveram softwares de dimensionamento hidráulico e avaliaram o desempenho da tecnologia na irrigação por gotejamento de hortaliças e fruticultura em condições de regime laminar. Em seguida, Souza (2008) avaliou seu uso em condições de regime turbulento. E com caráter mais inovador, Almeida, A. (2008) e Almeida, Botrel e Smith (2009) utilizaram o microtubo como mecanismo de regulação de pressão em sistemas de microaspersão.

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para o dimensionamento de sistemas de irrigação que utilizam microtubos. Recentemente, por ser uma configuração inovadora, foi desenvolvido um novo modelo para o caso de microtubo conectado a seis microtubos emissores (microtubos ramificados). Esse sistema é caracterizado por possuir menor custo em comparação com os sistemas atuais, que utilizam microtubos, tendo em vista a menor quantidade de material necessário à sua implantação (ALVES et al., 2012). Todavia,

esse sistema apresentou problemas de obstrução e aprisionamento de ar. Neste sentido, foi realizado um aprimoramento dessa configuração inovadora de modo a eliminar os problemas observados. Portanto, o emissor aprimorado denominado “microtubo com múltiplas saídas” é um tipo de gotejador inexistente no mercado e em trabalhos acadêmicos. Além disso, a análise do escoamento d’água nesse gotejador é bastante complexa, pois, sua geometria envolve estreitamento e alargamento de seções no interior do emissor sendo necessária a avaliação de seus parâmetros hidráulicos e o desenvolvimento de modelos matemáticos para dimensionamento desse sistema de irrigação.

Acerca dos modelos hidráulicos necessários para caracterizar o escoamento nos microtubos, existem métodos e ferramentas computacionais aptas a simular o escoamento em emissores, linhas laterais, e quaisquer outros elementos de sistemas de irrigação. O aplicativo ANSYS Fluent permite a simulação e análise das características de escoamento em equipamentos de irrigação, e pode auxiliar no estudo do escoamento no protótipo de emissor, e analisar os locais mais favoráveis a ocorrência de obstrução e de perda localizada de carga, tornando-se uma importante ferramenta para compreensão do comportamento hidráulico do gotejador proposto.

Diante do exposto, pretende-se com esta pesquisa, compreender e modelar o comportamento hidráulico em microtubos com múltiplas saídas focando nos seguintes objetivos:

- Avaliar a sensibilidade dos microtubos com múltiplas saídas à obstrução por agentes físicos;
- Realizar simulações hidráulicas do escoamento nos microtubos com múltiplas saídas utilizando o programa computacional ANSYS Fluent;
- Identificar áreas críticas que possam contribuir para a obstrução dos emissores por partículas sólidas;
- Entender com detalhes o desenvolvimento da perda de carga no interior do conector, identificando-se as regiões que proporcionam maior dissipação de energia; e,
- Analisar a adequação das equações do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Microirrigação

A microirrigação tem se tornado um dos métodos de irrigação mais populares, especialmente em áreas onde a água é um recurso escasso. Caracteriza-se por aplicar água com baixa vazão, alta frequência e próximo à zona radicular da planta mantendo a umidade do solo nesta região perto da capacidade de campo. Geralmente a água é aplicada na forma de gotas, na superfície ou subsuperfície do solo (gotejamento) ou aspergida (microaspersão) (Figura 1).

A.

B.

Figura 1 - Sistema de microirrigação. A - gotejamento; B - microaspersão
Fonte: Frizzzone et al. (2012)

No sistema de irrigação por gotejamento aplicam-se vazões de 1 a 20 L h⁻¹ enquanto que no sistema de irrigação por microaspersão aplicam-se vazões de 20 a 150 L h⁻¹ (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). No entanto, existe no mercado gotejadores com vazão menor do que o especificado pelos autores.

Ressalta-se que é comum a utilização da irrigação por gotejamento nas espécies cultivadas em fileiras, empregando-se a microaspersão naquelas que apresentam maior espaçamento entre plantas. Isso porque, o sistema de irrigação por microaspersão em comparação com o sistema de irrigação por gotejamento apresenta maior raio molhado e melhor adaptação às culturas de maior espaçamento e de grande extensão do sistema radicular.

O sistema de irrigação por gotejamento opera sob menor pressão de operação, quando comparado ao sistema de irrigação por microaspersão, demandando menor potência do

sistema de bombeamento. As perdas de água no sistema de microaspersão normalmente são maiores devido à maior superfície molhada de solo, além do que, a água é lançada ao ar, possibilitando perdas por evaporação direta e deriva pela ação do vento.

Os sistemas de microirrigação são, de modo geral, definidos pelo dispositivo de emissão de água que podem ser desde simples orifícios em tubos plásticos de parede fina, emissores de fluxo laminar de longo percurso e microaspersores, até os mais eficientes emissores de fluxo turbulento, compensadores de pressão e autodrenantes (FRIZZONE et al., 2012).

Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2006); Frizzone et al. (2012), Pescod (1992), Vermeiren e Jobling (1997), esses sistemas apresentam diversos benefícios, tais como: economia de água - a irrigação ocorre em apenas uma fração da área cultivada, permitindo um maior controle do volume de água aplicado e limitando também o desenvolvimento de plantas daninhas; adaptam-se a diversas condições de cultivo, clima, topografia e solos - permitem a ampliação da produção vegetal em locais irrigados com restrições de solo (solos com altas ou baixas taxas de infiltração) e de água (disponibilidade); facilita a aplicação de fertilizantes e defensivos; reduz a exigência de mão de obra para operação - permitem automação parcial ou total, facilitando a operação do sistema quando a mão de obra é limitada ou de alto custo; reduz o consumo de energia - operam com pressões de operação menores quando comparado aos outros tipos de sistemas pressurizados; redução de impactos ambientais - com a elevada eficiência de aplicação de água é possível reduzir as perdas por percolação profunda, e assim, diminuir a contaminação de águas subterrâneas, minimizando o carreamento de nutrientes e resíduos contaminantes ao longo do perfil do solo; mínimo contato entre o irrigante e o efluente - isto reduz os riscos de contaminação do irrigante com a água utilizada para irrigação, quando tal cuidado é pertinente.

As principais limitações do sistema, de acordo com os mesmos autores, são: problemas com entupimento; má distribuição do sistema radicular - as raízes das plantas tendem a se concentrar apenas na região umedecida, reduzindo a estabilidade da planta no solo e criando condições de possíveis tombamentos; acúmulo de sais próximo às plantas - se esses sais forem levados para dentro da zona radicular em consequência da precipitação pluvial, pode ocasionar estresse às plantas pela redução do potencial osmótico; geração de resíduos não biodegradáveis; custo alto na aquisição.

2.1.1 Emissores para irrigação por gotejamento

Os emissores são dispositivos dimensionados para dissipar energia de pressão da água e aplicar uniformemente pequenas vazões (FRIZZONE et al., 2012).

Os seguintes termos e definições são utilizados para distinguir os emissores (ABNT, 2006):

- ✓ emissor - dispositivo instalado numa linha lateral de irrigação e projetado para descarregar água na forma de gotas ou fluxo contínuo;
- ✓ emissor *in-line* - emissor projetado para instalação entre dois trechos de tubo em uma lateral de irrigação;
- ✓ emissor *on-line* - emissor projetado para instalação na parede de uma linha lateral de irrigação, quer direta ou indiretamente, por meio de um microtubo;
- ✓ emissor de múltiplas saídas - emissor no qual a vazão é dividida e direcionada de forma distinta a vários pontos diferentes;
- ✓ emissor múltiplo - emissor de múltiplas saídas no qual cada saída é um emissor secundário com sua própria vazão. A relação entre pressão e vazão de cada saída ($q = kp^m$) geralmente não é dependente da vazão de outros emissores;
- ✓ tubo emissor - tubo contínuo ou microtubo, incluindo tubo colapsável (“fita”) com perfurações ou outros dispositivos hidráulicos modelados ou integrados no tubo e projetados para descarregar água na forma de gotas ou fluxo contínuo;
- ✓ emissor/tubo emissor regulado - emissor/tubo emissor compensador de pressão, ou seja, mantém uma vazão relativamente constante a pressões variadas da água na entrada do emissor/tubo emissor dentro dos limites especificados pelo fabricante;
- ✓ emissor/tubo emissor não regulado - emissor/tubo emissor não compensador de pressão, ou seja, a vazão varia com a pressão da água na entrada.
- ✓ emissor/tubo emissor regular - emissor/tubo emissor cuja vazão é diferente de zero, quando a pressão de entrada for diferente de zero; e,
- ✓ emissor/tubo emissor antidrenante - emissor/tubo emissor cuja vazão é zero sempre que a pressão na entrada do emissor/tubo emissor é inferior a um valor (diferente de zero) declarado pelo fabricante;

Os diferentes tipos de tubos emissores podem ser visualizados na Figura 2.

A. Tubo emissor com gotejador tipo bóbi integrado

B. Tubo emissor com gotejador tipo pastilha integrado

C. Tubo emissor com gotejador “on-line”

D. Microtubo do tipo espaguete

E. Tubo emissor com gotejador “in-line”

F. Tubo emissor com gotejador com múltiplas saídas

Figura 2 - Vista de alguns tipos de tubos emissores
 Fonte: Figura 2E - Frizzzone et al. (2012)

2.1.2 Uso de microtubos na microirrigação

Os microtubos, também chamado de espaguete, são gotejadores de longo percurso feito de polietileno de pequeno diâmetro, de baixo custo, fácil instalação e manutenção (ALVES, 2010). Além disso, quando dimensionados corretamente, possibilitam uma elevada uniformidade de distribuição de água, destacando-se como um importante instrumento para a elevação do nível tecnológico e competitividade de pequenos irrigantes (SOUZA, 2005).

Na Tabela 1 podem ser visualizadas as especificações técnicas dos microtubos fabricados pela empresa PLASNOVA Louveira Ltda.

Tabela 1 - Especificações técnicas dos microtubos

Cor do microtubo	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro externo (mm)	Comprimento da bobina (m)
Amarelo	0,6	2,5	400
Verde	0,7	2,5	400
Laranja	0,8	2,5	400
Azul	1,0	2,5	400
Branco	1,5	2,5	400

Fonte: PLASNOVA Louveira Ind. Com. Ltda (2014)

Ressalta-se que, os sistemas que utilizam microtubos podem funcionar por um longo tempo de irrigação sem onerar os custos operacionais, operando sob força da gravidade ou sob utilização de pequenas pressões. Aliado a isto, os microtubos podem ser adaptados para diversas situações, inclusive locais onde existem grandes diferenças de pressão devido à topografia, sendo possível compensar a variação de pressão por meio da variação do comprimento dos microtubos, e consequentemente, obter vazão uniforme ao longo da linha lateral (ALVES et al., 2012).

Geralmente esses emissores são utilizados em sistemas de irrigação que funcionam sob regime de escoamento laminar (SOUZA; BOTREL, 2004; SOUZA; PÉREZ; BOTREL, 2006; SOUZA et al., 2009; ALVES et al., 2012) porém, eles também podem ser utilizados em sistemas com regime turbulento (ALMEIDA; BOTREL; SMITH, 2009; SOUZA et al., 2011).

Contudo, esse sistema apresenta algumas desvantagens como: alta sensibilidade à variação de temperatura e pressão quando trabalha em regime laminar (FRIZZONE et al., 2012) e elevada susceptibilidade ao entupimento (SOUZA; BOTREL 2004; ALMEIDA; BOTREL; SMITH, 2009). Além disso, a montagem deste sistema é trabalhosa e requer muita mão-de-obra sendo sua utilização restrita a pequenas áreas (ALVES et al., 2012).

Para um correto dimensionamento do sistema de irrigação com microtubos, necessita-se de um projeto criterioso e detalhado. Desse modo, Pizarro Cabello (1996) recomenda que as características desses emissores sejam determinadas experimentalmente em laboratório, utilizando-se um modelo adequado de representação da perda de carga, conforme teoria hidráulica. Com isso, é fundamental a determinação do diâmetro real do microtubo, uma vez que, qualquer erro na sua atribuição poderá ocasionar grande diferença na estimativa da vazão (ALVES et al., 2012).

Diversos trabalhos foram desenvolvidos com sistemas de microirrigação utilizando microtubos. Souza et al. (2009) avaliaram a viabilidade técnica e o impacto da utilização de kits de irrigação por gravidade com microtubos na melhoria da capacidade de produção agrícola de comunidades no meio rural do Ceará, e concluíram que o kit facilitou o

desenvolvimento das atividades agrícolas, além do sistema de irrigação ter apresentado bom desempenho técnico (uniformidade de distribuição - UD = 87%). Souza, Pérez e Botrel (2006) analisaram a técnica de irrigação por gotejamento com microtubos em hortas agrícolas (Figura 3) e concluíram que essa prática é viável tecnicamente e economicamente para os pequenos produtores. Adicionalmente, esses autores compararam o custo dos microtubos com o dos tubos gotejadores e verificaram que a utilização de linhas laterais com microtubos proporcionou uma economia de 54,4%. Da mesma forma, valor de UD classificado como excelente foi verificado no trabalho de Souza et al. (2011), e de Bhatnagar e Srivastava (2003).

Figura 3 - Sistema de microirrigação utilizando microtubos
Fonte: Souza, Pérez e Botrel (2006)

Alves (2010) desenvolveu e avaliou um sistema de irrigação com ultra baixa vazão (UBV) utilizando microtubos ramificados. Este sistema inovador foi dimensionado para operar sob pressão de 14,72 kPa e vazão de $0,2 \text{ L h}^{-1}$ em cada microtubo emissor (Figura 4). Todavia, apesar desse sistema ter apresentado excelentes valores iniciais do coeficiente de uniformidade estatístico (US), vantagens econômicas para pequenos produtores, devido ao baixo custo de investimento e facilidade de operação do sistema, o mesmo apresentou problemas de acúmulos de ar e obstrução de emissores durante o período avaliado, ocasionando a redução do US no final do experimento.

Figura 4 - Esquema do sistema de irrigação com ultra baixa vazão utilizando microtubos ramificados
Fonte: Alves (2010)

2.1.3 Hidráulica de microtubos

Em decorrência do tipo de material utilizado, do diâmetro do tubo, da espessura da parede e da geometria do emissor, torna-se importante analisar as características hidráulicas do emissor, visando fornecer elementos para o projeto do sistema de irrigação (FRIZZONE et al., 1998).

O microtubo utilizado na irrigação dissipa energia ao longo de seu comprimento, descarregando uma baixa vazão (SOUZA; BOTREL, 2004). O seu comprimento e diâmetro podem ser selecionados para diferentes vazões, possibilitando utilizá-lo como emissor.

O dimensionamento de microtubos é realizado com base no cálculo da perda de carga ocasionada pelo emissor em determinada condição de vazão e pressão, a qual resulta de uma combinação entre perda contínua e localizada de carga e energia de velocidade.

O comprimento do microtubo para uma determinada vazão pode ser calculado pela equação de Darcy-Weisbach apresentada na eq. (1).

$$hf = f \frac{LV^2}{2gD} \quad (1)$$

em que:

hf - perda contínua de carga no microtubo, m;

f - fator de atrito, adimensional;

L - comprimento do microtubo, m;

D - diâmetro interno do microtubo, m;

V - velocidade da água no microtubo, m s^{-1} ; e

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

No caso de regime de escoamento laminar ($\text{Re} \leq 2300$), o fator de atrito (f) é calculado pela equação de Hagen-Poiseuille apresentada na eq. (2).

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2)$$

em que:

Re - número de Reynolds, adimensional calculada pela eq. (3).

$$\text{Re} = \frac{VD}{\mu} \quad (3)$$

em que:

μ - viscosidade cinemática da água, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Para regime turbulento ($\text{Re} \geq 4000$ e $< 10^5$), o fator de atrito é calculado pela equação de Blasius apresentada na eq. (4).

$$f = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}} \quad (4)$$

A perda localizada de carga e a energia de velocidade podem ser representadas pelas eq. (5) e eq. (6), respectivamente:

$$\Delta H_L = k \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

$$EV = \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

em que:

ΔH_L - perda localizada de carga, m;

k - coeficiente de perda localizada de carga, adimensional; e

EV - energia de velocidade, m.

A equação de Darcy-Weisbach é a fórmula universal de cálculo de dissipação de energia que ocorre no escoamento em tubulações, podendo ser aplicada para quaisquer situações de transporte de fluidos. No entanto, existem diferentes equações que estimam a quantidade de energia dissipada no escoamento de água, todas, dentro de suas limitações, podem fornecer bons resultados, oferecendo até mesmo praticidade nos cálculos. Porém, sua aplicação se limita às condições para as quais as mesmas foram desenvolvidas.

Existem equações desenvolvidas empiricamente para o dimensionamento de microtubos. De acordo com Fizzzone et al. (2012), a equação de perda de carga para um microtubo pode ser expressa na seguinte forma geral apresentada na eq. (7).

$$hf = K_p \frac{Q^m}{D^n} L \quad (7)$$

em que:

hf - perda contínua de carga no microtubo, m;

K_p - coeficiente de proporcionalidade, adimensional;

Q - vazão do microtubo, $m^3 h^{-1}$;

m - expoente de fluxo do emissor ($m = 1$ para escoamento laminar, 2 para escoamento completamente turbulento e 1,75 para escoamento turbulento em tubo liso);

D - diâmetro interno do microtubo, m;

n - expoente do diâmetro; e,

L - comprimento do microtubo, m.

Vermeiren e Jobling (1997) apresentam a seguinte relação entre vazão, carga piezométrica, comprimento e diâmetro interno do microtubo que é representada pela eq. (8).

$$Q = aL^b hf^c D^d \quad (8)$$

em que:

a, b, c e d - são coeficientes que dependem do valor do diâmetro interno do microtubo;

Q - vazão do microtubo, $L h^{-1}$;

L - comprimento do microtubo, m;

hf - perda de carga contínua do microtubo, m; e,

D - diâmetro interno do microtubo, mm.

Esses coeficientes podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes “a”, “b”, “c” e “d” da fórmula proposta por Vermeiren e Jobling (1997) para cálculo da vazão de um microtubo

Coeficientes	Diâmetro interno (mm)						
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
a	0,86	0,91	1,02	1,14	1,16	1,28	1,38
b	-0,78	-0,75	-0,72	-0,68	-0,65	-0,62	-0,58
c	0,85	0,82	0,78	0,75	0,72	0,69	0,65
d	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1

Souza e Botrel (2004) desenvolveram um modelo para o cálculo da perda de carga em microtubos funcionando sob regime laminar e considerando três componentes para a perda total de carga (perda localizada de carga, perda contínua de carga e energia de velocidade), conforme observa-se na eq. (9). Segundo esses autores, o desempenho do modelo desenvolvido por eles foi superior ao modelo desenvolvido por Vermeiren e Jobling (1997).

$$hf = \frac{128\mu}{\pi g} \left(\frac{LQ}{D^4} \right) + \frac{8}{\pi^2 g} \left(\frac{Q^2}{D^4} \right) + \left(\frac{(a \ln(Re) + b)Q^2}{D^4} \right) \quad (9)$$

em que:

a e b - coeficientes da equação que expressa o coeficiente de perda localizada de carga (K) em função do Re, adimensional

Os autores utilizaram microtubos com quatro diâmetros diferentes submetidos a diferentes pressões. Por meio dos resultados dos ensaios em laboratório e do software computacional Table Curve 3D, obtiveram os coeficientes “a” e “b”. O modelo desenvolvido pelos autores apresentou elevado coeficiente de determinação, e, também foi possível concluir que a perda localizada de carga é um fator importante, devendo ser considerado no dimensionamento do microtubo.

Os valores de diâmetro efetivo, dos coeficientes “a”, “b”, e coeficiente de determinação do ajuste (R^2) podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de diâmetro interno, “a”, “b” e coeficiente de determinação do ajuste

Microtubo	R^2	a	b	Diâmetro interno (mm)
A	0,994	1,007	-7,584	1,009
B	0,997	1,154	-7,959	0,835
C	0,997	1,533	-9,926	0,738
D	0,998	1,401	-9,062	0,726

Alves et al. (2012) desenvolveram um modelo para dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento com ultra baixa vazão ($0,2 \text{ L h}^{-1}$) utilizando microtubos ramificados. O modelo desenvolvidos por estes autores pode ser observado na eq. (10), cujas

variáveis independentes foram: pressão, diâmetro interno e vazão. O microtubo ramificado consiste de um microtubo denominado de microtubo conector, cujo comprimento varia ao longo da linha lateral funcionando como um regulador de pressão; um segmento de tubo (ligado ao microtubo conector) de onde saem seis microtubos emissores. O comprimento dos microtubos emissores não varia pois, a pressão no segmento de tubo é constante. Os autores verificaram que os valores de vazão medidos no campo ficaram próximos do valor de vazão de projeto, o que demonstra a qualidade do modelo matemático utilizado no dimensionamento dos microtubos para regime laminar.

$$L_c = \left(\frac{P_{ei} - P_{st_{calc}} - \Delta H_L}{J} \right) \quad (10)$$

em que:

L_c - comprimento do microtubo conector, m;

$P_{st_{calc}}$ - pressão no segmento de tubo calculada, m;

P_{ei} - pressão na entrada do microtubo conector no iésimo ponto (i) ao longo da linha lateral, m; e,

J - perda de carga unitária do microtubo, $m \cdot m^{-1}$.

Calcula-se o comprimento do microtubo emissor dividindo-se a perda de carga no microtubo emissor pela sua perda de carga unitária (J) que foi calculada pela eq. (11).

$$J = f \frac{V^2}{2gD} \quad (11)$$

A pressão na entrada do microtubo conector no iésimo ponto da linha lateral (P_{ei}) é determinada pela eq. (12).

$$P_{ei} = P_{ei-1} + hf_{i-1} \pm IEc \quad (12)$$

em que:

i - iésima posição do microtubo conector ao longo da linha lateral;

P_{ei-1} - pressão no ponto anterior ao iésimo ponto (i), m;

hf_{i-1} - perda de carga no trecho “i-1”, m;

I - declividade no terreno, decimal; e,

Ec - espaçamento entre microtubos conectores, m.

A pressão no segmento de tubo é calculada pela eq. (13).

$$P_{st_{calc}} = P_e - hf_c \quad (13)$$

em que:

P_e - pressão na entrada do microtubo conector, m; e,

hf_c - perda de carga no microtubo conector, m.

Segundo os autores, a perda localizada de carga só pode ser determinada empiricamente, pois os diâmetros dos microtubos fornecidos pelo fabricante geralmente não são iguais ao diâmetro real. Para o cálculo da perda localizada de carga (ΔH_L) foi utilizada a eq. (14).

$$H_{loc} = P_{st_{calc}} - P_{st_{obs}} \quad (14)$$

em que:

$P_{st_{obs}}$ - pressão no segmento de tubo de derivação observada, m.

Considerando que o segmento de tubo de derivação e os microtubos não apresentam uniformidade construtiva, fica evidente que a caracterização do emissor por meio do coeficiente de perda localizada de carga é um fator complicador para aplicação prática do modelo de dimensionamento de microtubos ramificados (ALVES et al., 2012).

Outros autores também trabalharam com modelo matemático para dimensionamento de sistema de irrigação utilizando microtubos: Almeida (2008) desenvolveu um modelo para dimensionamento do sistema de irrigação por microaspersão com microtubos. Souza (2005) utilizou um modelo matemático para elaboração de um software para dimensionamento de linhas laterais com microtubos em microirrigação. Souza et al. (2011) desenvolveram um modelo matemático WSBOTREL para dimensionamento de microtubos sob regime de escoamento turbulento, e o modelo avaliado teve ótimo desempenho com coeficiente de determinação acima de 98%, baixo erro médio absoluto e coeficiente de variação de vazão.

Outro fator importante que deve ser analisado nas características hidráulicas dos microtubos é a influência da variação da temperatura na vazão desses emissores. Souza (2005) avaliou a influência de diferentes temperaturas da água (15, 25, 30 e 35 °C) no desempenho do sistema de irrigação com microtubos funcionando sob pressão de 100 kPa, e concluiu que a cada 5 °C de aumento na temperatura da água, a vazão média aumentou em

5%; porém, mesmo com uma variação de 15 °C na temperatura da água, a uniformidade de distribuição foi superior a 90%, e o coeficiente de variação de vazão só ultrapassou 5% no caso extremo de 35 °C na temperatura da água. Oliveira (1978) avaliou o efeito da temperatura da água sobre a vazão dos gotejadores Dangotas, Irriga e em microtubos sob pressão constante, concluindo que, em comparação com outros gotejadores, o microtubo estudado obteve menor variação de vazão na linha lateral, desde que sob mesma temperatura. Pinto, Alves e Botrel (2012) estudaram a influência da temperatura em microtubos e realizaram simulações para o sistema de microirrigação funcionando com temperaturas de 0 a 40 °C e pressão constante de 14,7 kPa, sendo verificado que a vazão varia em 20% e a uniformidade de aplicação reduz em 0,67%, para cada mudança de temperatura de 10 °C.

2.1.4 Coeficiente de variação de fabricação

Admitindo-se que as variações de vazão causadas pelo processo construtivo têm distribuição normal, é possível utilizar os conceitos de estatística clássica para análises quantitativas (FRIZZONE et al., 1998).

A variação de fabricação é representada estatisticamente pelo coeficiente de variação de vazão dos emissores obtido a partir de uma amostra aleatória de emissores submetidos à mesma carga de pressão (FRIZZONE et al., 2012).

Solomon (1979) propôs um coeficiente de variação de fabricação (CVf), dado pela eq. (15).

$$CVf = \frac{\sigma}{\bar{q}} \quad (15)$$

em que:

CVf - coeficiente de variação de fabricação, adimensional;

σ - desvio padrão das vazões dos emissores, sob mesma carga de pressão; L h⁻¹ e,

$\bar{q}$ - média das vazões, L h⁻¹.

De acordo com Solomon (1979), o CVf é um importante fator que influencia a uniformidade de emissão da água e a eficiência do sistema de irrigação. Frizzone et al. (2012) afirmam que qualquer desvio na geometria interna do emissor, em forma ou em tamanho, causará variação de vazão do emissor, por este motivo, se um conjunto de emissores de igual modelo for submetido à mesma pressão esses terão vazões diferentes.

Para qualificar os emissores, a NBR ABNT ISO 9261:2006 estabeleceu os seguintes requisitos: a vazão média da amostra não deve divergir da vazão nominal por mais que $\pm 7\%$ e o CVf da amostra não deve exceder 7%.

A classificação dos emissores quanto ao CVf pode ser efetuado por meio das propostas de Solomon (1979) e/ou ASABE (2010) como está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos emissores quanto ao coeficiente de variação de fabricação

CVf (%)	Classificação do emissor
SOLOMON (1979)	
0 a 3	Excelente
4 a 7	Média
8 a 10	Marginal
11 a 14	Pobre
Acima de 15	Ruim
ASABE (2010) para gotejadores e microaspersores (norma EP405.1)	
< 5	Excelente
5 a 7	Média
7 a 11	Baixa
11 a 15	Marginal
> 15	Inaceitável
ASABE (2010) para tubos gotejadores (norma EP405.1)	
< 10	Boa
10 a 20	Média
> 20	Marginal e inaceitável

2.1.5 Obstrução de emissores

A obstrução dos emissores pode ocorrer por agentes físicos, químicos e/ou biológicos (Tabela 5). A determinação da causa da obstrução pode ser complexa pelo fato de ocorrer vários agentes na água interagindo entre si, agravando o problema, sobretudo se for considerada a natureza dinâmica dos indicadores de qualidade de muitas águas (RAVINA et al., 1992).

Tabela 5 - Principais agentes físicos, químicos e biológicos que provocam obstruções nos sistemas de microirrigação

Físicos (Sólidos em suspensão)	Químicos (Precipitação)	Biológicos (Bactérias e Algas)
1. Inorgânico	1. Carbonato de Ca e Mg	1. Filamentos
a. Areia	2. Sulfato de cálcio	2. Lodo
b. Silte	3. Metais pesados:	3. Depósitos microbiológicos
c. Argila	a. óxidos	a. Ferro
2. Orgânico	b. hidróxidos	b. Enxofre
a. Plantas aquáticas (fitoplâncton/alga)	c. carbonatos	c. Manganês
b. Animais aquáticos (zooplâncton)	d. silicatos	
	e. sulfetos	
	4. Fertilizantes	
	a. Fosfato	
	b. Amônia líquida	
	c. Fe, Cu, Zn e Mn	

Fonte: Bucks et al. (1979)

Em ocasiões em que não são executadas medidas preventivas, a obstrução é considerada como o principal problema em microirrigação, podendo ocasionar danos em todo o processo produtivo, por afetar a taxa de aplicação e a UD de água, elevando os custos de manutenção, de reposição de peças, de recuperação e com inspeções (FRIZZONE et al., 2012).

Existem vários trabalhos sobre obstrução de emissores (TAJRISHY et al., 1994; KREIJ; VAN DER BURG; RUNIA, 2003; DURAN-ROS et al., 2009; PUIG-BARGUÉS et al., 2010; LI; LI; ZHANG, 2012; SILVA et al., 2012) em que a maioria usam água residuária para avaliar a susceptibilidade de diferentes gotejadores à obstrução ou avaliam alternativas para evitar a obstrução.

Almeida et al. (2013) avaliaram a susceptibilidade ao entupimento de microtubos com quatro diâmetros internos: 0,6; 0,7; 0,8 e 1,0 mm, sob diferentes manejos de fertirrigação, simulando o cultivo do meloeiro. Os resultados obtidos apontaram queda na susceptibilidade ao entupimento, conforme a seguinte ordem de diâmetros de microtubos: 0,7; 0,6; 1,0 e 0,8mm.

A baixa velocidade da água ($< 0,5 \text{ m s}^{-1}$) favorecem o desenvolvimento e acúmulo de microorganismos nas paredes das tubulações, os quais posteriormente são levados para o interior dos emissores ocasionando a obstrução dos mesmos (RAVINA et al., 1997).

Souza e Moreira (2012) analisaram os efeitos da aplicação de esgoto sanitário na

uniformidade de aplicação de sistemas de microirrigação. Para isso, esgoto sanitário foi submetido a três níveis de tratamento (preliminar - ESP, secundário - ESS e terciário - EST) e aplicados por gotejamento durante período de 500 horas, sendo, a cada 100 horas de funcionamento, determinado o coeficiente de uniformidade estatística (Us). Também, para avaliar os riscos de entupimentos, foram determinadas as características físicas, químicas e biológicas. De acordo com os resultados, concluiu-se que as características ferro total e coliformes totais representaram risco severo de obstrução para gotejadores submetidos a ESP, ESS e EST, enquanto para as características manganês total, magnésio e cálcio apresentaram baixo risco. A formação de biofilme de sólidos suspensos e bactérias foi a principal causa de obstrução de gotejadores. Os valores de Us apresentaram, após 500 horas de operação, redução de 54%; 24% e 59%, para os sistemas de irrigação submetidos a ESP, ESS e EST, respectivamente.

Pode-se avaliar e classificar o potencial de risco da água no entupimento de sistemas de microirrigação com o uso de um ou mais dos critérios que estão apresentados na Tabela 6. No entanto, antes de serem realizadas as recomendações para o tratamento da água, é necessário que seja considerada a interdependência dos efeitos da qualidade da água e do tipo de emissor, garantindo assim, um longo funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento (TAJRISHY; HILLS; TCHOBANOGLIOUS, 1994).

Tabela 6 - Critérios para classificação do potencial de risco de águas no entupimento de sistemas de microirrigação

Causa obstrutora potencial	Unidade	Grau de restrição do uso		
		Nenhum	Leve a moderado	Severo
Físicos				
Sólidos suspensos	mg L ⁻¹	< 50	50 - 100	> 100
Químicos				
pH	-	< 7,0	7,0 - 8,0	> 8,0
Sólidos dissolvidos	mg L ⁻¹	< 500	500 - 2000	> 2000
Manganês	mg L ⁻¹	< 0,1	0,1 - 1,5	>1,5
Ferro total	mg L ⁻¹	< 0,2	0,2 - 1,5	> 1,5
Sulfeto de hidrogênio	mg L ⁻¹	< 0,2	0,2 - 2,0	> 2,0
Biológicos				
População bacteriana	Nº máximo de UFC*/mL	< 10000	10000 - 50000	> 50000

*Unidades Formadoras de Colônias

Fonte: Gilbert e Ford (1986)

O entupimento por causa física pode também ocorrer devido a presença de restos de insetos pequenos ou de materiais utilizados na montagem do sistema, como partículas de PVC no interior da tubulação. Estudos realizados por Gilbert et al. (1981) verificaram que a principal causa de entupimento e consequente redução da vazão dos emissores foi ocasionada

por obstrução física, apresentando 55 % das ocorrências. Segundo Ayers e Westcot (1999), a obstrução por sólidos em suspensão, os quais acontecem com maior frequência nas águas superficiais, é o problema mais comum e também o mais fácil de solucionar, podendo-se utilizar: a sedimentação para as partículas mais pesadas - método mais antigo e barato, contudo sua eficácia não é segura; e a filtração - é mais confiável desde que o elemento filtrante seja compatível com o orifício de saída dos emissores.

O potencial de entupimento dos emissores são diferenciados em função de características como qualidade da água, diâmetro de passagem, velocidade do fluxo e das características físicas construtivas. De acordo com Pizarro Cabello (1996), os emissores podem ser agrupados em três categorias quanto à sensibilidade de entupimento em função do diâmetro interno (Tabela 7).

Tabela 7 - Sensibilidade dos emissores ao entupimento em função do diâmetro interno

Diâmetro interno (mm)	Sensibilidade à obstrução
$\leq 0,7$	Alta
0,7 a 1,5	Média
$> 1,5$	Baixa

Emissores que trabalham subsuperficialmente podem ser ainda mais susceptíveis ao entupimento que os emissores que trabalham superficialmente, tendo vista que além das causas já mencionadas, estão sujeitos à entrada de raízes no orifício de passagem da água, os quais poderão ficar obstruídos e com vazão reduzida. Souza et al. (2012) verificaram que após 12 meses de avaliação foram constatados, no sistema irrigação por gotejamento subsuperficial, vazão relativa a vazão inicial de 0,51 e 0,98%, em vasos com e sem cultura, respectivamente. Também observaram que o grau de entupimento por raiz foi de 49,22%, sendo constatado emissores com solo em seu interior.

Segundo Frizzone et al. (2012) três alternativas têm sido apresentadas para minimizar o problema de obstrução dos emissores:

- ✓ desenvolvimento de emissores menos sensíveis à obstrução - neste caso, depende da indústria, do processo de fabricação, da qualidade do produto e de testes prévios, antes da comercialização;
- ✓ melhoria da qualidade da água utilizada na irrigação - pode inviabilizar o uso da microirrigação por representar elevado custo para o tratamento da água;
- ✓ adoção de medidas preventivas - é a alternativa mais viável economicamente no campo e a mais utilizada, compreendendo a filtragem da água, tratamento químico, lavagem das linhas laterais e frequentes inspeções de campo.

Souza, Cordeiro e Costa (2006) avaliaram a aplicação de doses de cloro (50, 100 e 150 mg de cloro livre L⁻¹) de água na recuperação da vazão nominal (QN) de gotejadores Netafim-Ram 17, que apresentavam vazão média (QM) superior à QN, em razão de entupimentos ocorridos durante dois anos de irrigação com água contendo 1,7 mg L⁻¹ de ferro total. A vazão média dos gotejadores decresceu gradativamente em todas as doses aplicadas com o aumento do número de aplicações. Os autores concluíram que os melhores resultados foram alcançados na dosagem de 150 mg L⁻¹, na qual se alcançou a vazão nominal.

Ribeiro et al. (2005) monitoraram uma fonte hídrica superficial utilizada em um sistema de irrigação por gotejamento durante um ano, analisando a variação temporal de fatores físicos, químicos e biológicos da água e que causam problemas de entupimento nos emissores. Os resultados mostraram que os fatores químicos (pH, ferro e sulfetos) apresentaram risco médio de obstrução aos emissores, enquanto os fatores físicos e biológicos analisados indicaram risco baixo de entupimento dos emissores.

2.2 Programa computacional ANSYS Fluent

Com os avanços tecnológicos é possível a utilização de métodos computacionais para originar modelos matemáticos que representem processos físicos complexos como é o caso da dissipação de energia no escoamento de água em microtubos, baseando-se nos princípios da hidráulica. Esses cálculos/simulação podem ser validados por meio de dados experimentais envolvendo perda de carga e vazão.

O programa ANSYS Fluent que utiliza o modelo Computacional de Dinâmica dos Fluidos (CFD) é uma ferramenta de simulação bastante utilizada para a previsão, visualização e investigação do movimento d'água em gotejadores. Dessa maneira, tal ferramenta pode ser utilizada em emissores com geometrias complexas cujos resultados das simulações (quando configuradas adequadamente) podem ser semelhantes aos dados experimentais.

Por meio da utilização do modelo CFD é possível a visualização das linhas fluxos d'água, do campo de velocidade, pressão e dissipação de energia no interior do emissor. Gamri et al. (2014) analisaram os locais mais favoráveis a ocorrência de obstrução e compararam com os resultados obtidos em laboratório (Figura 5). Os mesmos autores concluíram que o desenvolvimento do biofilme ocorreu em locais com menor velocidade de água.

Figura 5 - Comparação entre emissores obstruídos (A e C) e simulação hidráulica (B e D) utilizando o programa computacional ANSYS Fluent

Fonte: Gamri et al. (2014)

Wei et al. (2006a) compararam a curva vazão versus pressão de gotejadores do tipo labirinto e verificaram que os dados simulados foram condizentes com os dados medidos em laboratório. Simulações hidráulicas também foram realizadas por Seyedashraf, Akhtari e Shahidi (2012) em curvas de 90°, e verificaram que os resultados obtidos foram semelhantes aos dados experimentais.

Todavia, existem vários modelos que podem ser utilizados para realizar as simulações com o ANSYS Fluent e sua escolha depende do número de Reynolds o qual determina o regime de escoamento. Os procedimentos para modelagem utilizando o programa ANSYS Fluent pode ser verificado pelo fluxograma apresentado na Figura 6.

Diversos outros trabalhos foram realizados com esse software. Palau-Salvador et al. (2006) avaliaram a perda localizada de carga em gotejadores do tipo on-line e compararam com os resultados empíricos. Mehmood et al. (2013) utilizaram o programa computacional ANSYS Fluent para estimar a variação de pressão e de velocidade da água no interior de uma tubulação cuja bomba utilizada era acionada por meio de painéis solares. Wei et al. (2006b, 2008) e Wu et al. (2013) analisaram as características do escoamento d'água em emissores de

sistema de microirrigação, referindo-se principalmente a susceptibilidade dos gotejadores a obstrução, que é um dos principais problemas desse sistema.

Adicionalmente, essa ferramenta pode auxiliar os projetistas a desenvolver novos emissores, evitando-se geometrias e dimensões que favoreçam a ocorrência de obstrução. Segundo Wei et al. (2006a), a utilização do modelo CFD pode diminuir o número e o tempo de experiências laboratoriais.

Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos para modelagem utilizando o programa computacional ANSYS Fluent

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e etapas da pesquisa

A condução dessa pesquisa dividiu-se em duas etapas: a primeira consistiu no aprimoramento do emissor com múltiplas saídas desenvolvido por Alves (2010); na determinação do diâmetro interno dos microtubos; em ensaios preliminares de verificação do modelo de dimensionamento dos microtubos com múltiplas saídas; e, na determinação do coeficiente de variação de fabricação, que foram realizados no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, situada no município de Piracicaba - SP. A segunda consistiu na investigação da perda localizada de carga e perda contínua de carga em microtubos; na modelagem do escoamento d’água no interior do microtubo com múltiplas saídas; e, na avaliação da sensibilidade dos microtubos à obstrução por agentes físicos, que foram realizados no Laboratoire d'essais et de recherche des matériels d'irrigation pertencente ao Institut national de recherche en sciences et technologies pour l’environnement et l’agriculture (LERMI/IRSTEA, Aix en Provence, Montpellier, França). Ressalta-se que, em todos os ensaios a temperatura da água foi mensurada a fim de obter o valor da viscosidade cinemática e o valor de sua massa específica.

3.2 Descrição do microtubo com múltiplas saídas (MMS)

Com base no emissor desenvolvido por Alves (2010), denominado de “microtubo ramificado”, realizou-se um aprimoramento desse emissor, uma vez que foi observado problemas de obstrução e acúmulo de ar relatado pelo autor. O emissor proposto nesta pesquisa, tem distribuição radial de água, de forma a reduzir os problemas constatados por Alves (2010).

O emissor proposto consiste de um microtubo regulador de pressão (MRP), seis microtubos emissores (ME) que estão acoplados ao MRP por meio de um conector (Figura 7). Esse conector pode ser visualizado em maiores detalhes na Figura 8. Ressalta-se que, o MRP foi denominado desta forma pelo fato de seu comprimento poder ser ajustado de acordo com a pressão no ponto de inserção do MRP na linha lateral de forma a manter constante a pressão na parte central do conector.

Figura 7 - Esquema do microtubo com múltiplas saídas

Figura 8 - Conector: A - vista inferior; B - vista superior; C - vista lateral; D - vista em perspectiva

3.3 Determinação do diâmetro interno dos microtubos

Antes de serem realizados os testes com o sistema de irrigação proposto, necessitou-se determinar o diâmetro real dos microtubos, pois, qualquer variação no diâmetro poderia ocasionar grande alteração no valor da vazão prevista no projeto.

Foram avaliados microtubos com diâmetro nominal de 0,8 e 1,0 mm, fabricados pela empresa Plasnova Louveira Ind. Com. Ltda, cujo diâmetro externo de ambos é de 2,5 mm. A determinação do diâmetro interno do microtubo foi realizada por meio de medidas hidrodinâmicas em laboratório, sob regime laminar, conforme metodologia proposta por Almeida e Botrel (2010). Para isso, foram utilizados microtubos com comprimento de 5 m, submetidos a uma pressão constante de 12,4 kPa. Considerou-se um comprimento de microtubo buscando reduzir os efeitos da perda localizada de carga (existente na entrada do microtubo), minimizando a importância da mesma na determinação do diâmetro. A pressão de operação foi estimada com base na distância entre o nível da água do reservatório superior e o final do microtubo. Foram utilizados dois reservatórios em que por meio da força da

gravidade, a água presente no reservatório superior foi conduzida pelo microtubo para o reservatório inferior de massa conhecida, destinado à coleta de água durante um determinado intervalo de tempo, e pesado posteriormente em uma balança analítica de resolução de 0,01g. A vazão foi determinada pela razão entre o volume e o tempo em que a água foi coletada. Para cada microtubo foram realizadas três repetições. A necessidade de saber a temperatura da água se deve ao fato do escoamento sob regime laminar ser bastante sensível à variação da viscosidade da água, a qual é influenciada pela variação da temperatura, além disso, o peso específico da água é também função da temperatura.

Os diâmetros internos dos microtubos foram calculados por meio de dados obtidos nos ensaios, aplicados na eq. (16) proposta por Almeida e Botrel (2010).

$$D = \left(\frac{0,08262647Q^2 + 4,153269\mu LQ}{Z} \right)^{0,25} \quad (16)$$

em que:

D - diâmetro interno do microtubo, m;

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

L - comprimento do microtubo, m;

Q - vazão no microtubo, $m^3 s^{-1}$; e

Z - carga de posição, m.

3.4 Ensaios preliminares de verificação do modelo de dimensionamento dos microtubos com múltiplas saídas

O cálculo do comprimento dos MRP e ME, foi realizado com base em uma planilha eletrônica, cujas variáveis independentes foram: pressão, diâmetro e vazão. Utilizou-se o modelo desenvolvido por Alves et al. (2012) para o dimensionamento dos microtubos.

Inicialmente admitiu-se os seguintes valores no projeto: vazão de $1 L h^{-1}$ para o ME e de $6 L h^{-1}$ para MRP, viscosidade de $1,01 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ para uma temperatura de $23 ^\circ C$, pressão de alimentação de 49,05 kPa e pressão na parte central do conector de 10,79 kPa.

O fator de atrito (f) e o número de Reynolds (Re) foram calculados por meio das eqs. 2 e 3, respectivamente. Ressalta-se que a utilização da eq. 2 deve-se ao fato do regime de escoamento ser laminar ($Re \leq 2300$).

No cálculo da perda de carga no microtubo regulador de pressão e no microtubo

emissor, foi utilizada a equação de Bernoulli apresentada na eq. (17).

$$hf = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 \quad (17)$$

em que:

hf - perda contínua de carga no microtubo, m;

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

$\frac{V^2}{2g}$ - carga cinética, m; e

Z - carga de posição, m.

Foram calculados os comprimentos (L) do microtubo regulador de pressão e do microtubo emissor dividindo-se a perda de carga (hf) pela perda de carga unitária (J) do microtubo. Isto pode ser observado na eq. (18). Esse cálculo foi realizado desprezando-se a perda localizada de carga que pode existir na conexão do microtubo regulador de pressão com a linha lateral e o conector.

$$L = \frac{hf}{J} \quad (18)$$

Os resultados dos cálculos do comprimento do microtubo emissor e do microtubo regulador de pressão podem ser visualizados na Tabela 8. Esses dados são a base dos ensaios realizados em laboratório, visando obter a relação entre pressão e vazão, e a verificação da aderência do modelo de dimensionamento.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados para determinação do comprimento do microtubo emissor e do microtubo regulador de pressão

Microtubo	Vazão* (L h ⁻¹)	D (mm)	Re	f	J (m m ⁻¹)	P* (kPa)	hf (kPa)	L (m)
Emissor	1,0	0,888	395	0,162	1,87	10,79**	10,69	0,584
Regulador de pressão	6,0	1,074	1960	0,033	5,26	49,05***	38,26	0,742

D: diâmetro interno; Re: número de Reynolds; f: fator de atrito; J: perda de carga unitária; hf: perda de carga; L: comprimento do microtubo

* Valores predefinidos

** Pressão na parte central do conector

*** Pressão na entrada do microtubo regulador de pressão

Constatou-se que a pressão na parte central do conector era próxima a 7,85 kPa quando utilizou-se o microtubo regulador de pressão (diâmetro interno de 1,074 mm) com

comprimento de 0,742 m. Devido a esse resultado, foram realizados outros ensaios preliminares, cortando o MRP em diferentes tamanhos, a fim de verificar qual o comprimento do microtubo que proporcionasse a pressão de 10,79 kPa no conector. Tal resultado foi obtido quando testou-se o comprimento de 0,542 m. Todavia, observou-se que mesmo obtendo a pressão desejada no conector, a vazão nos ME foi inferior a 1 L h^{-1} . Logo, realizaram-se mais testes similares e constatou-se que para se ter a vazão desejada o microtubo tinha que ter comprimento de 0,41 m. Neste caso, a pressão no conector foi de 12,75 kPa. Por esta razão alguns ensaios, que serão descritos posteriormente, foram realizados com os comprimentos acima citados. Contudo, salienta-se que o comprimento do ME não foi alterado.

3.5 Características hidráulicas de microtubos

3.5.1 Coeficiente de variação de fabricação dos microtubos com múltiplas saídas

Foram ensaiados 30 MMS submetidos a pressão constante de 49,05 kPa e tempo de coleta de 5 min, sendo efetuadas 3 repetições. O comprimento do microtubo regulador de pressão ensaiado foi de 0,41 m. O CVf foi determinado aplicando-se a eq. 15. Os recipientes para coleta de água foram pesados antes e depois de cada coleta em balança de precisão de 0,01 g, sendo a massa transformada em volume ao dividi-la pela massa específica da água. As vazões foram determinadas mediante a razão entre o volume e o tempo de cada coleta.

3.5.2 Curva vazão-pressão dos microtubos com múltiplas saídas

Foi montada uma bancada de ensaios composta por: uma bomba centrífuga, uma caixa d'água, um filtro de tela, uma linha lateral (LL) com diâmetro interno de 10 mm, três microtubos com múltiplas saídas, um manômetro tipo tubo U utilizando mercúrio como líquido indicador para monitorar a pressão de alimentação da linha, e três piezômetros para medir e monitorar a pressão no conector em cada microtubo com múltiplas saídas (Figura 9). Para isto, foi realizado um furo no centro da parte inferior do conector e neste foi colado um tubo o qual foi conectado ao piezômetro (Figura 10).

Figura 9 - Esquema da bancada de ensaio

Durante os ensaios, os três microtubos com múltiplas saídas foram colocados em funcionamento simultaneamente, os quais foram ensaiados sob diferentes pressões de entrada: 20,40; 30,31; 35,22; 40,22; 45,13; 49,05; 50,03; 55,03 e 59,93 kPa. As pressões foram reguladas por meio de dois registros sendo um instalado no início da LL e outro no final onde era realizado o controle da quantidade de água que saía no final da linha lateral. Quanto ao comprimento do MRP, realizou-se os ensaios com 0,742 m e 0,542 m. Cada teste teve três repetições.

Figura 10 – Detalhes da ligação do conector ao piezômetro. A - adaptador para leitura da pressão no conector; B - microtubo inserido no adaptador; C - conexão do microtubo ao tubo de diâmetro maior; D - piezômetros

3.5.3 Curva vazão-pressão dos microtubos

Este ensaio foi realizado usando três comprimentos de microtubos (1; 0,5 e 0,25 m). Inicialmente, foram utilizados três microtubos com diâmetro interno de 1,074 mm e cinco microtubos com diâmetro interno de 0,888 mm, todos com comprimento inicial de 1 m. Na fase seguinte, os microtubos foram cortados em comprimentos de 0,5 m, resultando em seis microtubos com diâmetro interno de 1,074 mm e dez microtubos com diâmetro interno de 0,888 mm. Finalmente, os microtubos foram cortados em comprimentos de 0,25 m, totalizando doze microtubos com diâmetro interno de 1,074 mm e vinte microtubos com diâmetro interno de 0,888 mm. Os ensaios foram realizados sob pressões médias de 43,16; 38,26; 33,35; 27,47; 22,56 e 12,75 kPa. O tempo de coleta foi de 10; 5 e 4 min para o microtubo com comprimento de 1; 0,5 e 0,25 m respectivamente.

3.5.4 Perda localizada de carga (ΔH_L)

3.5.4.1 Verificação da existência de perda localizada de carga no microtubo com múltiplas saídas

Para o cálculo da perda localizada de carga do microtubo com múltiplas saídas foi utilizada a eq. (19). Considerou-se dois comprimentos do MRP: 0,742 e 0,542 m. O comprimento do ME foi mantido constante (0,584 m). Cada comprimento do MRP avaliado contou com três repetições.

$$\Delta H_L = P_c - P_{co} \quad (19)$$

em que:

P_c - pressão calculada na parte central do conector, m; e

P_{co} - pressão observada na parte central do conector, m.

3.5.4.2 Verificação da existência de perda localizada de carga nos microtubos

Para isso, foram utilizados um manômetro diferencial, dois microtubos com comprimentos de 0,742 e 0,542 m e diâmetro interno de 1,074 mm, e uma válvula para regular a saída de água, a qual foi coletada em um recipiente de peso conhecido. O tempo de cada coleta foi de 5 min. Foram realizadas três repetições para cada vazão testada em função da perda de carga. Primeiramente, realizou-se o ensaio com microtubo de comprimento de

0,742 m e após finalizado o ensaio, esse microtubo foi cortado no comprimento de 0,542 m para em seguida, ser realizado novamente o teste. Esse procedimento foi necessário para assegurar que o diâmetro dos microtubos utilizados nos ensaios eram idênticos. Admitiu-se que a perda de carga total no microtubo é igual a diferença de pressão entre o início e o fim do mesmo. Para determinação da perda distribuída de carga no microtubo, utilizou-se a equação de Darcy-Weisbach apresentada na eq. (1). Como o regime de escoamento utilizado no ensaio foi laminar, determinou-se o fator de atrito pela equação de Hagen-Poiseuille apresentada na eq. (2). O esquema do ensaio realizado para determinação da perda localizada de carga no microtubo pode ser visualizado por meio da Figura 11.

Figura 11 - Esquema do ensaio realizado para determinação da perda localizada de carga no microtubo

Assumiu-se que a perda localizada de carga é igual à diferença entre a perda de carga total (hf_{total}) e a perda distribuída de carga (hf) calculada pela equação universal, conforme se verifica na eq. (20).

$$\Delta H_L = hf_{total} - hf \quad (20)$$

Como os microtubos eram os mesmos, sendo alterados apenas o seu comprimento, supõe-se que a perda localizada de carga seja a mesma para a mesma vazão. Caso contrário, comprova-se que a diferença entre a perda de carga experimental e a calculada por meio da equação de Darcy-Weisbach é um erro de estimativa, e por sua vez, não caracteriza a perda localizada de carga.

3.5.5 Determinação do fator de atrito da equação de perda de carga universal

Uma vez que não verificou-se coerência da hipótese da existência de perda localizada de carga, foram efetuadas análises no cálculo do fator de atrito da equação universal apresentada na eq. (1). Dessa maneira, foram utilizadas as propostas apresentadas por Hagen-Poiseuille, Blasius, Prandtl e Swamee (1993), conforme as eqs. (2), (4), (21) e (22), respectivamente. Apesar das equações de Prandtl e Blasius serem recomendadas para o regime de escoamento turbulento de parede lisa ($Re > 4000$), as mesmas foram aplicadas para $Re < 2300$, buscando verificar a possibilidade de concordância com os dados experimentais. O valor da rugosidade absoluta da parede do microtubo adotado foi de 0 m.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{Re \sqrt{f}}{2,51} \right) \quad (21)$$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{e^*}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (22)$$

em que:

e^* - rugosidade absoluta da parede do microtubo, m.

Os resultados da perda de carga unitária calculada pelas equações foram comparados com os dados experimentais obtidos no item 3.5.3, onde os microtubos foram testados sob diferentes pressões e vazões.

3.6 Simulação do escoamento d'água no microtubo com múltiplas saídas utilizando o software ANSYS Fluent

Realizaram-se simulações numéricas utilizando o programa ANSYS Fluent® versão 14.5 que utiliza a interface Workbench. As simulações foram realizadas em três etapas: criação da geometria, criação da malha e modelagem.

3.6.1 Criação da geometria

Utilizou-se a interface Design Modeler do ANSYS Workbench para criação da geometria que consiste em desenhar o trajeto de escoamento d'água no interior do microtubo com múltiplas saídas (Figura 12).

Figura 12 - Geometria em 3D do trajeto de escoamento d'água no interior do microtubo com múltiplas saídas. A - vista em perspectiva, B - vista superior

Devido o comprimento do microtubo regulador de pressão e do microtubo emissor ser grande (0,542 e 0,584 m respectivamente) necessitou-se dividir os microtubos em tamanhos menores, uma vez que, para tal dimensão geraria um número de elementos elevado e necessitaria de um microcomputador com capacidade de processamento não disponível. Portanto, o comprimento do microtubo regulador de pressão (MRP) foi simulado com 4 ao invés de 54,2 cm, enquanto que o microtubo emissor (ME) foi simulado com 2 ao invés de 58,4 cm (Figura 12). Sendo assim, simulou-se o escoamento d'água no interior de um MRP com comprimento de 4 cm e diâmetro de 1,074 mm + um conector + seis ME de 2 cm e diâmetro de 0,888 mm. O diâmetro interno nas seis saídas do conector (SC) é de 2,5 mm.

Para facilitar o entendimento, o microtubo de múltiplas saídas completo, ou seja, com MRP e ME de 0,542 e 0,584 m, respectivamente, será representado por MMSc e o microtubo de múltiplas saídas usado nas simulações será representado por MMSs.

3.6.2 Criação da malha

Utilizou-se a interface Meshing do ANSYS Workbench para geração da malha que permite a solução numérica das equações de escoamento. Após a geração da malha, realizou-se o seu refinamento. Esse procedimento consiste em reduzir o tamanho máximo da malha na região desejada (Figura 13).

Figura 13 - Malha do tipo tetraédrica no conector do microtubo com múltiplas saídas com tamanho máximo de $1,5 \times 10^{-4}$ m

Como a qualidade da malha exerce grande influência nos resultados da simulação, foram testados diferentes tamanhos e tipos de malha (tetraédrica e quadrilateral-triangular), pretendendo-se obter aquela que melhor se adequasse à geometria e aos modelos testados (k- ϵ e laminar). Os critérios utilizados para distinguir as melhores malhas foram: a) perfil de velocidade - dentro do mesmo tipo de malha pode-se dizer que a malha está adequada quando seu tamanho é reduzido e não se percebe alterações no perfil de velocidade; b) número de elementos - é limitado pela memória do computador, pois quando aumenta-se indiscriminadamente o número de elementos da malha, tem-se a necessidade de maior memória para processar as informações, no caso em questão foi utilizado um limite de $1,5 \times 10^6$ elementos; c) simetria da solução - a solução em cada emissor tem que ser a mais próxima possível; e d) convergência - depende da qualidade da malha, do tipo de malha e do modelo utilizado. Além disso, para avaliação da qualidade da malha utilizou-se dois indicadores: assimetria e qualidade ortogonal que serão descritas a seguir:

- ✓ assimetria - a regra geral é que a assimetria máxima para uma malha triangular / tetraédrica na maior parte dos fluxos deve ser mantida abaixo de 0,95. Células muito assimétricas pode diminuir a precisão e desestabilizar a solução;
- ✓ qualidade ortogonal - as piores células terão uma qualidade ortogonal mais próximo de 0 e as melhores células mais próximo de 1. A qualidade ortogonal mínima para todos os tipos de células deve ser superior a 0,01.

Foram testadas as malhas tetraédrica (Tr) e quadrilateral-triangular (Qd) com

refinamento da malha no conector no qual existe mudança brusca de velocidade e de direção do fluxo. Os valores de tamanho máximo (T max) e mínimo (T min), bem como os indicadores de qualidade da malha estão apresentados na Tabela 9.

Para o modelo k-ε, realizaram-se comparações entre as malhas tetraédricas com T max no conector de $1,5 \times 10^{-4}$ m e $2,0 \times 10^{-4}$ m; $1,5 \times 10^{-4}$ m e $2,5 \times 10^{-4}$ m; $1,5 \times 10^{-4}$ m e $3,0 \times 10^{-4}$ m. Ressalta-se que, k significa energia cinética turbulenta e ε significa taxa de dissipação.

Para o modelo laminar, realizaram-se comparações entre as malhas quadrilaterais-triangulares com T max no conector de $0,5 \times 10^{-4}$ m e $1,5 \times 10^{-4}$ m; $0,5 \times 10^{-4}$ m e $2,0 \times 10^{-4}$ m de modo a determinar a malha mais adequada para realizar as simulações.

Tabela 9 - Características das malhas testadas

Tabela 3 - Características das malhas testadas					
T min (m) ¹	Refinamento/T max (m) ²		Nº de elementos	Assimetria	Qualidade ortogonal
	Microtubos	Conector			
Modelo k-ε					
1,0 x 10 ⁻⁴ Tr	8,0 x 10 ⁻⁴	1,5 x 10 ⁻⁴	1213509	0,883	0,210
1,0 x 10 ⁻⁴ Tr	8,0 x 10 ⁻⁴	2,0 x 10 ⁻⁴	706590	0,902	0,253
1,0 x 10 ⁻⁴ Tr	8,0 x 10 ⁻⁴	2,5 x 10 ⁻⁴	575387	0,888	0,276
1,0 x 10 ⁻⁴ Tr	8,0 x 10 ⁻⁴	3,0 x 10 ⁻⁴	524758	0,888	0,273
1,0 x 10 ⁻⁵ Qd	0,5 x 10 ⁻⁴	0,5 x 10 ⁻⁴	1482360	0,894	0,156
Modelo laminar					
1,0 x 10 ⁻⁵ Qd	0,5 x 10 ⁻⁴	0,5 x 10 ⁻⁴	1482360	0,894	0,156
0,5 x 10 ⁻⁴ Qd	0,5 x 10 ⁻⁴	1,5 x 10 ⁻⁴	1471639	0,682	0,555
0,5 x 10 ⁻⁴ Qd	1,5 x 10 ⁻⁴	2,0 x 10 ⁻⁴	148330	0,789	0,380
1,0 x 10 ⁻⁴ Tr	8,0 x 10 ⁻⁴	1,5 x 10 ⁻⁴	1213509	0,883	0,210

¹ Tmin - tamanho mínimo; ² Tmax - tamanho máximo

A obtenção dos perfis de velocidade para comparação entre as diferentes malhas foi realizada por meio do traçado de três linhas no interior do conector na direção do plano xz, localizadas próxima à parede inferior, no centro e próxima à parede superior do conector, que corresponde, em relação a base do conector, a distância no eixo y de 0,25; 1,25 e 2,25 mm, respectivamente (Figura 14). Como a distância entre as duas extremidades das SC é de 22 mm e o ponto de origem dos eixos xyz está localizado no centro da parte inferior do conector, a coordenada do perfil de velocidade ao longo da base do conector varia de -11 a 11 mm.

Para verificação da simetria do perfil de velocidade nas saídas do conector, na interseção entre o conector e os microtubos emissores, e nos microtubos emissores, traçou-se linhas (na direção do eixo y) distanciados do centro do conector de 5, 11 e 20 mm respectivamente (Figura 14). Neste caso, a coordenada do perfil de velocidade varia de 0 a 2,5 mm; de 0 a 2,5 mm; e de 0 a 0,888 mm nas saídas do conector, na interseção entre o conector e os microtubos emissores, e nos microtubos emissores, respectivamente.

Figura 14 - Linhas traçadas para visualização do perfil de velocidade no conector e nos microtubos emissores

3.6.3 Modelagem

O regime de escoamento foi determinado em função do número de Reynolds (Re) de acordo com Porto (2006):

- Laminar ($Re < 2300$);
- Transição ($2300 < Re < 4000$); e
- Turbulento ($Re > 4000$).

O número de Reynolds calculado para o microtubo regulador de pressão foi igual a 1960 (próximo ao regime de transição) enquanto que, o número de Reynolds calculado para o microtubo emissor foi de 394 (regime laminar).

3.6.4 Procedimentos realizados para modelagem

Primeiramente, utilizou-se o modelo $k-\epsilon$ Standard o qual é indicado para regime turbulento e depois foi utilizado o modelo laminar. Isto foi necessário para verificar qual o modelo que melhor se adequava ao microtubo com múltiplas saídas.

Os resultados de perda de carga em função da vazão, para ambos os modelos, foram comparados com dados experimentais da curva vazão - pressão do microtubo com múltiplas saídas (MMSc) (Tabela 10).

Tabela 10 - Dados experimentais obtidos nos ensaios sob diferentes pressões

Pressão de entrada (kPa)	Microtubo emissor			Microtubo regulador de pressão		
	Vazão (L h ⁻¹)	Re	Vazão mássica (kg s ⁻¹)	Vazão (L h ⁻¹)	Re	Vazão mássica (kg s ⁻¹)
59,94	1,00	412	2,77x10 ⁻⁴	6,00	2043	1,66x10 ⁻³
49,05	0,85	343	2,34x10 ⁻⁴	5,07	1703	1,41x10 ⁻³
40,22	0,74	309	2,04x10 ⁻⁴	4,42	1534	1,23x10 ⁻³
30,31	0,58	247	1,61x10 ⁻⁴	3,47	1223	9,63x10 ⁻⁴
20,40	0,41	174	1,14x10 ⁻⁴	2,46	865	6,81x10 ⁻⁴

Para visualização das linhas de fluxo, campo de velocidade, k e ϵ ao longo de toda geometria traçou-se um plano vertical na direção yz passando pelo centro do conector. Além disso, apenas para visualização das linhas de fluxo, foi traçado um plano vertical na direção yx , traçados três planos na direção xz , passando pelas mesmas cotas dos perfis de velocidade descritos no item 3.6.2 (Figura 14). Estes campos e linhas de fluxo foram avaliados apenas sob as vazões de entrada máxima e mínima de 6,0 e 2,46 L h⁻¹, respectivamente.

O cálculo da perda de carga na outra parte do MRP e do ME foi feito de forma analítica (item 3.5.5). Os comprimentos dessas partes dos microtubos foram 0,502 m (diâmetro de 1,074 mm) e 0,564 m (diâmetro de 0,888 mm) para o MRP e ME, respectivamente. Portanto, os resultados para o MMSc foi obtido por meio de três etapas:

- 1 - Simulação do escoamento d'água no interior do MMSs (Figura 12);
- 2 - Cálculo da perda de carga no MRP com comprimento de 0,502 m (item 3.5.5); e
- 3 - Cálculo da perda de carga no ME com comprimento de 0,564 m (item 3.5.5).

Então, a perda de carga total no MMSc pode ser expressa pela eq. (23), que representa a soma das perdas de carga em cada componente.

$$\Delta P_{\text{MMSc}} = \Delta P_{\text{MRP}} + \Delta P_{\text{MMSs}} + \Delta P_{\text{ME}} \quad (23)$$

em que:

ΔP_{MMSc} - diferença de pressão entre a entrada e a saída do MMSc;

ΔP_{MRP} - diferença de pressão entre a entrada e a saída do MRP com comprimento de 0,502;

ΔP_{MMSs} - diferença de pressão entre a entrada e as saídas do MMSs; e,

ΔP_{ME} - diferença de pressão entre a entrada e a saída do ME com comprimento de 0,564 m.

3.7 Sensibilidade dos microtubos à obstrução por agentes físicos

Utilizou-se a metodologia proposta pelo IRSTEa (2013) para avaliar a sensibilidade

dos microtubos à obstrução por agentes físicos.

Foram ensaiados três ME com comprimento de 0,584 m e diâmetro de 0,888 mm, três MRP com comprimento de 0,410 m e diâmetro de 1,074 mm e três MMS funcionando sob pressão de entrada de 5 m, a qual foi monitorada por um manômetro analógico (Figura 15). Antes de iniciar os testes de obstrução, os microtubos foram ensaiados com água limpa.

Figura 15 - Bancada de testes de obstrução dos emissores

O ensaio de sensibilidade à obstrução foi realizado em quatro etapas sendo cada fase com duração de uma semana. O funcionamento do sistema foi de oito horas por dia e cinco dias por semana, com exceção da primeira semana em que os ensaios foram realizados em apenas três dias.

Na primeira semana foi acrescentada areia com diâmetro entre 0-80 μm em um tanque de 100 litros de água filtrada; na segunda semana, adicionou-se a esta solução, areia com diâmetro entre 80-100 μm ; na terceira semana, adicionou-se areia com diâmetro entre 100-

200 μm ; e, na quarta semana foi inserida areia com diâmetro entre 200-500 μm . Em cada etapa a concentração de areia acrescentada foi de 125 mg L^{-1} . Deste modo, no início da quarta semana, a concentração total de areia adicionada ao tanque foi de 500 mg L^{-1} .

A solução foi homogeneizada por meio de um agitador mecânico e em seguida, foi bombeada para os microtubos. Em todos os ensaios a água foi coletada durante 5 min em recipientes de peso conhecido. A coleta era realizada de 3 a 4 vezes por dia e a temperatura era juntamente mensurada. A vazão foi determinada por meio da razão entre o volume de água coletado e tempo de coleta.

Após finalizado o ensaio e desmontado o experimento, cortou-se as extremidades dos microtubos (entrada e saída) em tamanhos de 2 mm para serem observadas no microscópio. Também foi realizado um corte longitudinal para verificar se existia obstrução ao longo de seu comprimento.

Utilizou-se um microscópio da marca Motic modelo SMZ-168 com câmera de 2 M Pixel. As imagens capturadas pela câmera foram salvas no computador para visualização dos microtubos e dos conectores por meio de um programa computacional Motic Images Plus versão 2 ML.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características hidráulicas de microtubos

4.1.1 Coeficiente de variação de fabricação dos microtubos com múltiplas saídas

O emissor avaliado apresentou um CVf próximo a 3%, valor considerado excelente segundo Solomon (1979), bom segundo a ASABE (2010); e, abaixo dos 7% especificado pela NBR ABNT ISO 9261:2006. O resultado obtido está em concordância com a afirmação de Frizzone et al. (2012), que relatam que o coeficiente de variação de vazão para microtubos, em geral é baixo, da ordem de 2% a 5%.

De acordo com Dantas Neto et al. (1997), pequenas diferenças entre dois emissores aparentemente idênticos podem ocasionar modificações significativas na vazão do sistema. Logo, a qualidade do emissor é uma informação muito importante, tendo em vista que, o alto CVf pode causar baixa uniformidade de vazão no sistema.

4.1.2 Curva vazão-pressão para microtubos com múltiplas saídas

Os ensaios realizados em laboratório, com o emissor proposto, estabeleceram a relação entre a vazão e pressão dos MMS utilizando MRP de 0,742 e 0,542 m que pode ser visualizada na Figura 16 e Figura 17, respectivamente.

O expoente com valor de 0,8059 e 0,8217 apresentado pela equação para MMS com MRP de 0,742 e 0,542 m respectivamente, está de acordo com o recomendado por Keller e Karmelli (1974). Segundo esses autores, o expoente (x) da curva vazão-pressão caracteriza o regime de escoamento do emissor, em que $x = 0,5$ para o regime totalmente turbulento; $0,5 < x < 0,7$ para regime parcialmente turbulento; $0,7 < x < 1,0$ para regime de transição, e $x = 1,0$ para regime de escoamento laminar. Contudo, os mesmos autores comentam que emissores autocompensantes possuem expoentes $< 0,5$ (sendo o autocompensante ideal com $x = 0$).

Além disso, os coeficientes de determinação foram superiores a 99,6%, demonstrando um bom ajuste dos dados observados. Elevado valor de coeficiente de determinação também foi verificado no trabalho realizado por Alves et al. (2012) que utilizaram um sistema de microirrigação com microtubos ramificados.

Figura 16 - Curva vazão versus pressão de entrada no microtubo com múltiplas saídas utilizando microtubo regulador de pressão de 0,742 m de comprimento

Figura 17 - Curva vazão versus pressão de entrada no microtubo com múltiplas saídas utilizando microtubo regulador de pressão de 0,542 m de comprimento

4.1.3 Curva vazão-pressão dos microtubos

A curva vazão versus pressão para microtubos com diâmetro interno de 1,074 e 0,888 mm, para os comprimentos de 1; 0,5 e 0,25 m, podem ser visualizados na Figura 18 e Figura 19, respectivamente. De acordo com Keller e Karmelli (1974), os emissores de longo percurso como os microtubos podem ter valores de expoente que variem de 0,6 a 1,0, portanto, os expoentes com valores acima de 0,6 apresentados pelas equações é coerente com o que preconiza os autores. Além disso, os coeficientes de determinação foram superiores a 99,8%, demonstrando um bom ajuste dos dados observados.

Figura 18 - Curva vazão versus pressão para microtubo com diâmetro interno de 1,074 mm e comprimentos de 1; 0,5 e 0,25 m

Figura 19 - Curva vazão versus pressão para microtubo com diâmetro interno de 0,888 mm e comprimentos de 1; 0,5 e 0,25 m

4.1.4 Análise da perda localizada de carga (ΔH_L)

4.1.4.1 Microtubo com múltiplas saídas

A diferença entre a perda de carga total e a perda distribuída de carga (ΔH_L) nos microtubos com múltiplas saídas com MRP de 0,742 e 0,542 m de comprimento podem ser

visualizados na Figura 20. Verifica-se que não houve valores semelhantes para os dois comprimentos de MRP de mesmo diâmetro. Sabe-se que a perda localizada de carga (ΔH_L) independe do comprimento do microtubo, por isso, esse resultado não era esperado.

Figura 20 - Diferença entre a perda de carga total e a perda distribuída de carga (ΔH_L) no microtubo com múltiplas saídas utilizando microtubo regulador de pressão com 0,742 e 0,542 m de comprimento

4.1.4.2 Microtubo

As curvas que representam a perda de carga total e perda distribuída de carga versus vazão pode ser visualizada na Figura 21. Verifica-se que, para uma mesma vazão, tanto a perda de carga total como a perda de carga distribuída foi diferente nos dois microtubos. Isso é esperado pois, quanto maior o comprimento maiores serão as perdas de carga total e distribuída no emissor.

Figura 21 - Perda de carga total nos microtubos (com comprimentos de 0,742 m e 0,542 m e diâmetro interno de 1,074 mm) e perda de carga distribuída calculada pela equação de Darcy-Weisbach

A diferença entre a perda de carga total e a perda distribuída de carga (ΔH_L) também pode ser igual a perda localizada de carga quando o modelo de determinação da perda de carga calcula adequadamente este fator. Os valores de ΔH_L para os microtubos com comprimento de 0,742 e 0,542 m e diâmetro interno de 1,074 mm podem ser visualizados na Figura 22. Verifica-se que esta figura é semelhante à Figura 20.

Observa-se ainda que, conforme a vazão aumenta a diferença entre as curvas dos dois comprimentos de microtubos também aumenta. Além disso, ambas as curvas convergiram para o mesmo ponto quando a vazão foi próxima a 2 L h⁻¹. Isso demonstra que a diferença entre a perda de carga total mensurada e perda de carga calculada por meio da equação universal, não representa a perda localizada de carga, uma vez que esta deveria ser independente do comprimento dos microtubos. Diante dessa circunstância, no item a seguir serão analisadas diferentes formas de cálculo do fator de atrito da equação de perda de carga universal.

Figura 22 - Diferença entre a perda de carga total e a perda de carga distribuída (ΔH_L) nos microtubos com comprimento de 0,742 e 0,542 m e diâmetro interno de 1,074 mm

4.1.5 Determinação do fator de atrito da equação de perda de carga universal

O resultado da perda de carga unitária calculada pelas equações de Hagen-Poiseuille, Blasius, Prandtl e Swamee (1993) e os dados experimentais (obtidos no ensaio descrito no item 3.5.3), em função do número de Reynolds, para os microtubos com diâmetro interno de 1,074 e 0,888 mm, podem ser visualizados na Figura 23 e na Figura 24, respectivamente. Observa-se que o modelo laminar calculado não apresentou boa concordância com dados de perda de carga observados experimentalmente em microtubos quando foi considerada a faixa de número de Reynolds para regime de escoamento laminar indicado na literatura.

Pode-se perceber, por meio da Figura 23 e da Figura 24 que para $Re > 1000$ a equação de Prandtl teve a melhor concordância com os resultados experimentais, seguida da equação de Blasius. Contudo, para Re próximo a 1000, a equação de Hagen-Poiseuille subestimou a perda de carga unitária no microtubo, apesar de ter sido uma das equações que mais se aproximou dos dados experimentais. Também observa-se que a equação de Hagen-Poiseuille e de Swamee (1993) tiveram boa concordância para Re próximo a 500. Porém, para facilitar os cálculos, a perda de carga no MRP de 1,074 mm de diâmetro com comprimento de 0,502 m e no ME de 0,888 mm de diâmetro com comprimento de 0,564 m, aplicou-se a equação de Hagen-Poiseuille para $Re < 1000$, e a equação de Prandtl para $Re \geq 1000$.

Como a equação de Prandtl foi desenvolvida para regime turbulento, pode-se inferir que a faixa do Re para regime de escoamento laminar em microtubos é diferente da indicada na literatura para os tubos convencionais, uma vez que esta se ajustou bem aos dados

experimentais.

Figura 23 - Perda de carga unitária (J) em função do número de Reynolds (Re) em microtubo com diâmetro de 1,074 mm. L: Laminar (Hagen-Poiseuille); PL: Prandtl; SW: Swamee (1993); EXP: Experimental

Figura 24 - Perda de carga unitária (J) em função do número de Reynolds (Re) em microtubo com diâmetro de 0,888 mm. L: Laminar (Hagen-Poiseuille); PL: Prandtl; SW: Swamee (1993); EXP: Experimental

Logo, o cálculo da perda de carga por meio da equação de Hagen-Poiseuille, para $Re > 1000$, remetem a erros inadmissíveis para o dimensionamento de microtubos, sendo esse erro atribuído à perda localizada de carga. Contudo, diversos trabalhos sobre dimensionamento de sistemas de irrigação com microtubos (SOUZA; BOTREL 2004; ALVES et al., 2012) utilizaram a equação de Hagen-Poiseuille e obtiveram elevados

coeficientes de determinação de 99,67% e exatidão de 99,0%, respectivamente. Almeida e Botrel (2010) conduziram um experimento funcionando sob regime de escoamento laminar e desenvolveram um modelo para determinar o diâmetro interno do microtubo utilizando a equação de Hagen-Poiseuille e este método não apresentou diferenças quando comparado com o padrão (projektor ótico de perfil). Provavelmente, o número de Reynolds foi inferior a 500, pois, a pressão de alimentação e o comprimento utilizados pelos autores foram de 2 m e 3 m respectivamente.

Porém, para saber a faixa exata em que o regime de escoamento pode ser considerado laminar em microtubos, deve-se realizar um estudo mais detalhado coletando-se mais dados nos microtubos funcionando com Re no intervalo de 0 a 1000. Segundo Kandlikar, Joshi e Tian (2003), estudos indicam que existe presença de regime crítico em valores de Re muito abaixo de 2300 para pequenos diâmetros. Os mesmos autores estudaram o efeito da rugosidade em tubo de aço com pequeno diâmetro (1,067 e 0,620 mm) e a característica do escoamento d'água com baixo Re , e concluíram que o efeito da rugosidade, e consequentemente, da perda de carga foram mais significativos no tubo com menor diâmetro. Todavia, o Re foi próximo a 2300 para regime laminar. Isto supostamente pode ter ocorrido devido às características do material do tubo, o qual difere do polietileno.

De acordo com Xu et al. (2000), o regime de escoamento em microcanais ou microtubos, pode ser afetado pela rugosidade da superfície e pelo formato do canal. Os autores estudaram o fator de atrito no escoamento d'água em microcanais feito de placa de metal e observaram que o regime de transição foi detectado quando o Re foi próximo a 1500.

Portanto, possivelmente, existe o efeito da rugosidade da parede no microtubo que no escoamento sob regime laminar não é relevante. Contudo, como o diâmetro do microtubo é muito pequeno, este fator talvez deva ser considerado nos cálculos de perda de carga. Caso exista influência da rugosidade, o diâmetro interno do microtubo seria reduzido aumentando o número de Reynolds. Entretanto, são necessárias mais pesquisas para que se possa definir melhor esse fenômeno em microtubos.

4.2 Simulação do escoamento d'água no microtubo com múltiplas saídas utilizando o software ANSYS Fluent

4.2.1 Convergência do modelo para diferentes malhas

O modelo laminar não convergiu quando foi utilizada a malha tetraédrica. No caso da malha quadrilateral-triangular, o modelo laminar convergiu somente para as duas menores

vazões (2,46 e 3,07 L h⁻¹). Nas demais vazões simuladas (4,42, 5,07 e 6,0 L h⁻¹) a convergência não ocorreu. Na Figura 25 estão apresentados os resíduos da solução da equação de movimento em função do número de iteração para a vazão de 6,0 L h⁻¹. Pode-se observar que o modelo não convergiu para a solução mesmo depois de ter realizado um número de iterações superior a 40000. No entanto, o modelo k-ε convergiu para ambas as malhas (Tabela 11).

Figura 25 - Resíduos das equações de movimento em função do número de iterações

Tabela 11 - Convergência do modelo em função do tipo de malha

Tipo de malha	T min (m) ¹	Refinamento/T max (m) ²		Modelo	Convergência
		Microtubos	Connector		
Tetraédrica	1,0 x 10 ⁻⁴	8,0 x 10 ⁻⁴	1,5 x 10 ⁻⁴	laminar	Não
Quadrilateral-triangular	1,0 x 10 ⁻⁵	0,5 x 10 ⁻⁴	0,5 x 10 ⁻⁴	laminar	Sim
Tetraédrica	1,0 x 10 ⁻⁴	8,0 x 10 ⁻⁴	1,5 x 10 ⁻⁴	k-ε	Sim
Quadrilateral-triangular	1,0 x 10 ⁻⁵	0,5 x 10 ⁻⁴	0,5 x 10 ⁻⁴	k-ε	Sim

¹ Tmin - tamanho mínimo; ² Tmax - tamanho máximo

4.2.2 Avaliação da malha quadrilateral-triangular utilizando o modelo laminar

A comparação entre o perfil de velocidade localizado a 0,25 mm (inf); 2,25 mm (sup) e 1,25 mm (C) da base do conector para cada tamanho de malha é apresentada na Figura 26 e na Figura 27. Observa-se que houve maior variação no perfil de velocidade entre a malha de 0,5 x 10⁻⁴ m e 2,0 x 10⁻⁴ m. Salienta-se que na Figura 26 e na Figura 27, elaborou-se uma

legenda que identifica de forma conjunta a localização do ponto de simulação (inf, sup ou C) e a dimensão da malha em 10^{-4} m (inf 0,5 = inf $0,5 \times 10^{-4}$ m).

A simetria dos perfis de velocidade nas seis saídas do conector, nas interseções entre o conector e os ME, e nos microtubos emissores, localizados nos pontos distanciados a 5 mm (SC), 11 mm (INT) e 20 mm (ME) do centro do conector respectivamente, está apresentada na Figura 28. Nota-se pequenas diferenças entre os perfis das saídas do conector e perfis idênticos nos microtubos emissores, logo, pode-se considerar que o fluxo se dá de forma simétrica no MMS, para a malha e o modelo avaliado.

Figura 26 - Perfil de velocidade d'água na parte inferior (inf) e superior (sup) no conector para a vazão de 2,46 L h⁻¹. A - utilizando malha máxima de $0,5 \times 10^{-4}$ m e $1,5 \times 10^{-4}$ m; B - $0,5 \times 10^{-4}$ m e $2,0 \times 10^{-4}$ m

Figura 27 - Perfil de velocidade na parte central do conector para a vazão de 2,46 L h⁻¹. A - utilizando malha máxima de $0,5 \times 10^{-4}$ m e $1,5 \times 10^{-4}$ m; B - $0,5 \times 10^{-4}$ m e $2,0 \times 10^{-4}$ m

Figura 28 - Simetria do perfil de velocidade para vazão de 2.46 L h^{-1} . A - nas seis saídas do conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção entre o conector e o microtubo emissor utilizando malha máxima de $0.5 \times 10^{-4} \text{ m}$

4.2.3 Avaliação da malha utilizando o modelo k- ϵ

4.2.3.1 Malha tetraédrica

A comparação entre o perfil de velocidade localizado a 0.25 mm (inf) e 2.25 mm (sup) da base do conector para cada tamanho de malha é apresentada na Figura 29. As malhas que não apresentaram diferenças de resultados foram somente aquelas com refinamento de $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ e $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}$. Na parte central do conector, ou seja, localizada a 1.25 mm da base do conector não houve diferença entre o perfil de velocidade para as diferentes malhas utilizadas (Figura 30).

A simetria dos perfis de velocidade distanciados a 5; 11 e 20 mm do centro do conector, para as vazões de 2.46 e 6.0 L h^{-1} , podem ser visualizadas na Figura 31 e na Figura 32 respectivamente. Percebe-se que, independente da vazão, não houve diferença entre os perfis situados na mesma distância do centro do conector, o que demonstra simetria do fluxo entre os emissores.

Figura 29 - Perfil de velocidade da água na parte inferior (inf) e superior (sup) do conector para vazão de 6 L h⁻¹. A - utilizando malha com refinamento de 1,5 x 10⁻⁴ m e 2,0 x 10⁻⁴ m; B - 1,5 x 10⁻⁴ m e 2,5 x 10⁻⁴ m; C - 1,5 x 10⁻⁴ m e 3,0 x 10⁻⁴ m (C)

Figura 30 - Perfil de velocidade da água na parte central do conector para vazão de 6 L h⁻¹. A - utilizando malha com refinamento de 1,5 x 10⁻⁴ m e 2,0 x 10⁻⁴ m; B - 1,5 x 10⁻⁴ m e 2,5 x 10⁻⁴ m; C - 1,5 x 10⁻⁴ m e 3,0 x 10⁻⁴ m

Figura 31 – Simetria do perfil de velocidade para vazão de $6,0 \text{ L h}^{-1}$. A - nas seis saídas do conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção entre o conector e o microtubo (INT) utilizando malha com refinamento de $1,5 \times 10^{-4} \text{ m}$

Figura 32 – Simetria do perfil de velocidade para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - nas seis saídas do conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção entre o conector e o microtubo (INT) utilizando malha com refinamento de $1,5 \times 10^{-4} \text{ m}$

4.2.3.2 Malha quadrilateral-triangular

A simetria do perfil de velocidade localizado em pontos distanciados a 5, 11 e 20 mm do centro do conector pode ser visualizada na Figura 33 e na Figura 34. Perfis idênticos foram obtidos nas seis saídas do conector (SC), nos seis microtubos emissores (ME) e na interseção entre o conector e o microtubo emissor (INT). Portanto, foi considerado que os perfis de velocidade são simétricos no MMS. Entretanto, existe mudança no perfil de velocidade em cada posição adotada.

Figura 33 – Simetria do perfil de velocidade para vazão de $6,0 \text{ L h}^{-1}$. A - nas seis saídas do conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção (INT) entre o conector e os microtubos emissores utilizando malha de $0,5 \times 10^{-4} \text{ m}$

Figura 34 – Simetria do perfil de velocidade para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - nas seis saídas do conector (SC); B - nos seis microtubos emissores (ME); C - na interseção (INT) entre o conector e os microtubos emissores utilizando malha de $0,5 \times 10^{-4} \text{ m}$

Baseando-se nos resultados do perfil de velocidade, adotou-se a malha com tamanho máximo de $0,5 \times 10^{-4} \text{ m}$ para realizar as simulações sob o modelo laminar e $k-\epsilon$ pois, os resultados do perfil de velocidade foram mais simétricos.

4.2.4 Comparação entre o modelo $k-\epsilon$, modelo laminar e dados experimentais

4.2.4.1 Vazão e perda de carga

Os resultados das simulações utilizando o modelo $k-\epsilon$ e o modelo laminar foram comparados com os dados experimentais (Figura 35). Pode-se observar que o modelo laminar subestimou a perda de carga no microtubo regulador de pressão. Todavia, o modelo $k-\epsilon$ teve resultados mais próximos aos obtidos experimentalmente (EXP) cujo ensaio foi descrito no item 3.5.2. Mesmo assim, verifica-se que quanto menor a vazão, mais o resultado da simulação diverge dos dados experimentais.

Wei et al. (2006b) compararam os resultados obtidos experimentalmente com os resultados simulados utilizando o software ANSYS Fluent e observaram que a diferença entre

a vazão observada experimentalmente e a vazão simulada foi inferior a 4% indicando o uso desta ferramenta para auxiliar no estudo do escoamento d'água no interior do emissor e no dimensionamento do mesmo.

Neste ensaio, as diferenças máxima e mínima entre a pressão simulada pelo modelo k- ϵ e a pressão observada experimentalmente foi de 13% e de 0,2% respectivamente, ou seja, apesar de ser o modelo com o melhor resultado, a simulação não apresentou resultados totalmente satisfatórios. Todavia, essa diferença não deve ser completamente atribuída ao modelo, haja vista que, uma parte da determinação da perda de carga foi realizada por meio de cálculo analítico, conforme descrito no item 4.1.5. Ainda assim, com base na Tabela 10 e Figura 35, pode-se verificar que o modelo utilizado nas simulações teve resultados semelhantes aos dados experimentais para $Re > 1534$.

Figura 35 - Curva vazão versus perda de carga no microtubo com múltiplas saídas. EXP: dados experimentais; k- ϵ : simulação Fluent modelo k- ϵ ; laminar: simulação Fluent modelo laminar que convergiu apenas para vazões de 2,46 e 3,07 L h⁻¹

Como o modelo laminar não apresentou bons resultados, as simulações realizadas por meio deste modelo serão apresentadas no APÊNDICE.

4.2.4.2 Campo de velocidade e linhas de fluxo

Na Figura 36 e na Figura 37 pode-se observar o campo de velocidade (m s⁻¹) obtido pelo modelo k- ϵ para as respectivas vazões de 6,0 L h⁻¹ e 2,46 L h⁻¹. A velocidade máxima é

verificada no MRP e na entrada do conector. Velocidade próxima à zero é observada na parede do conector e na zona de recirculação (região do conector onde a vazão é direcionada ao ME), principalmente para a vazão de $6,0 \text{ L h}^{-1}$ (Figura 36B). Quanto menor a velocidade da água no interior do emissor, maior é a chance de deposição e acumulação de materiais presentes na água e, consequentemente, maior é a chance de entupimento dos emissores. Dessa forma, verifica-se que a área do emissor proposto com maior risco à obstrução está presente nas saídas do conector. Áreas com valores de velocidade próximo ou igual a zero devem ser evitadas, sendo necessária a realização de adequações na arquitetura do conector para minimizar as chances de entupimento do emissor proposto.

Figura 36 - Campo de velocidade (m s^{-1}) obtido pelo modelo k- ϵ para vazão de 6 L h^{-1} . A - plano horizontal; B - plano vertical

Figura 37 - Campo de velocidade (m s^{-1}) obtido pelo modelo k- ϵ para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - plano horizontal; B - plano vertical

As linhas de fluxo na parte inferior (a $0,25 \text{ mm}$ da base do conector), na parte superior (a $2,25 \text{ mm}$ da base do conector) e na parte central (a $1,25 \text{ mm}$ da base do conector) pode ser visualizada na Figura 38 e na Figura 39. As linhas de fluxo no plano zy e xy estão

apresentadas na Figura 40 e na Figura 41. Nota-se que as zonas de recirculação variam em cada distância da base do conector. Um importante fator a ser observado é a formação de vórtices na entrada do conector e quando a água atinge a parte inferior do conector e se move em direção aos microtubos emissores. Provavelmente, o alargamento de seção e a mudança brusca de direção do fluxo da água causam esta turbulência formada na entrada do conector e na região em que a água é direcionada para os microtubos emissores. Nessas regiões ocorrem as maiores taxas de perda localizada de carga. Resultados semelhantes foram verificados no trabalho de Wei et al. (2006b).

Segundo Azevedo Netto (1998) a perda localizada de carga pode ser desprezada nas tubulações longas cujo comprimento exceda cerca de 40000 vezes o diâmetro. São ainda desprezíveis nas canalizações em que a velocidade é baixa e o número de peças especiais não é grande. No entanto, isto não se enquadra ao emissor proposto, pois, o comprimento do microtubo regulador de pressão é pequeno, além disso, no conector derivam seis emissores. O MRP pode ocasionar perdas localizadas de carga decorrentes da inserção de parte de seu corpo no interior da linha lateral e no conector, funcionando como um ponto de formação, ou acréscimo, de turbulência. Aliado a isso, a inserção dos microtubos emissores no conector também pode contribuir para essas perdas.

Figura 38 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo k- ϵ para vazão de 6 L h⁻¹. A - localizadas a 0,25 mm da base do conector; B - localizadas a 2,25 mm da base do conector; C - localizadas a 1,25 mm da base do conector. A escala de cores representa o valor da velocidade

Figura 39 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo $k-\epsilon$ para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - localizadas a 0,25 mm da base do conector; B - localizadas a 2,25 mm da base do conector; C - localizadas a 1,25 mm da base do conector. A escala de cores representa o valor da velocidade

Figura 40 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo $k-\epsilon$ no plano vertical do conector e vazão de 6 L h^{-1} . A - plano yz ; B - plano xz . A escala de cores representa o valor da velocidade

Figura 41 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo k- ϵ no plano vertical do conector e vazão de 2,46 L h⁻¹. A - plano zy; B - plano xz. A escala de cores representa o valor da velocidade

4.2.4.3 Energia cinética turbulenta (k) e taxa de dissipação (ϵ)

A região do MMS com maior energia cinética turbulenta e maior taxa de dissipação foi verificada na entrada do conector (Figura 42 e Figura 43). Isso ocorreu devido o fluxo d'água sair de uma seção de menor diâmetro entrar em uma seção de maior diâmetro. Observa-se também que, na parte basal do conector, os maiores valores de energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação ocorreram na região em que fluxo d'água se divide em direção às saídas do conector. Além disso, elevados valores de k e ϵ são verificados na entrada do microtubo emissor, onde a água saiu de uma seção de maior diâmetro e entrou em uma seção de menor diâmetro.

Estes locais com maiores taxas de dissipação e energia cinética turbulenta ocasionadas pela mudança brusca de fluxo, provocada pelo alargamento e/ou estreitamento da seção que contribuem para maiores perdas localizada de carga no conector. De acordo com Cardoso e Frizzone (2007); Zitterell et al. (2009) e Gomes et al. (2010), a perda localizada de carga pode ocorrer quando o fluido sofre alguma perturbação brusca em seu escoamento, por algum elemento nele inserido, causando turbulência local. Nas demais regiões, os valores da energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação foram próximos ou igual a zero, podendo ser justificado pela velocidade do fluxo aproximadamente nula. Segundo Wei et al. (2006b) a principal causa da dissipação de energia ocorre devido à perda localizada de carga.

A taxa de dissipação está diretamente relacionada à energia cinética turbulenta, ou seja, as maiores taxas de dissipação ocorreram nas mesmas regiões que acontecerem maiores magnitudes da energia cinética turbulenta.

Quanto maior o valor de k e de ϵ , maior será as colisões entre as partículas presentes na água, o que pode causar a aglomeração de pequenas partículas, transformando-se em

partículas maiores, ocasionando a obstrução do emissor. Para Wei et al. (2006b) a presença de vórtice no interior do emissor aumenta a energia cinética a qual afeta diretamente a dissipação de energia e a velocidade e consequentemente, na vazão do emissor.

Figura 42 - Campo de energia cinética turbulenta (k) ($\text{m}^2 \text{s}^2$) obtido pelo modelo k-ε. A - plano horizontal; B - plano vertical. Taxa de dissipação (ε) ($\text{m}^2 \text{s}^3$), C - plano horizontal, D - plano vertical para vazão de 6 L h^{-1}

Figura 43 - Campo de energia cinética turbulenta (k) ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) obtido pelo modelo k - ϵ . A - plano horizontal; B - plano vertical. Taxa de dissipação (ϵ) ($\text{m}^2 \text{s}^{-3}$), C - plano horizontal, D - plano vertical para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$

4.3 Sensibilidade dos microtubos à obstrução por agentes físicos

Os resultados dos ensaios realizados nos microtubos utilizando água limpa podem ser visualizados na Tabela 12. Verifica-se que a vazão do microtubo emissor 2 (ME2) é inferior à vazão dos microtubos emissores 1 e 3; provavelmente o diâmetro do ME2 é menor que os demais microtubos emissores ou o microtubo estava parcialmente obstruído.

Tabela 12 - Vazão em cada microtubo e vazão média do microtubo emissor (ME), microtubo regulador de pressão (MRP) e microtubo com múltiplas saídas (MMS) em ensaio realizado com água limpa

Microtubos	Vazão (L h^{-1})	Vazão média (L h^{-1})
ME1	3,58	3,32
ME2	2,71	
ME3	3,67	
MRP1	7,91	7,87
MRP2	7,87	
MRP3	7,84	
MMS1	6,61	6,68
MMS2	6,80	
MMS3	6,64	

4.3.1 Microtubos emissores

Na primeira semana não houve problemas de obstrução com exceção do microtubo emissor 2 (ME2) cuja vazão reduziu em 16,3% após 22 horas de funcionamento. Observa-se que este gotejador teve vazão inferior aos demais microtubos emissores em todos os ensaios realizados. Na segunda semana, o microtubo emissor 1 (ME1) e o microtubo emissor 3 (ME3) funcionaram normalmente, todavia, o ME2 ficou totalmente obstruído, e no dia seguinte, voltou a funcionar regularmente. Essa desobstrução pode ter ocorrido no momento que o sistema foi acionado. Possivelmente a pressurização ocasionou a expulsão das partículas que estavam obstruindo o emissor. A partir da terceira semana todos os microtubos emissores estavam obstruídos, contudo, o ME1 voltou a funcionar, provavelmente pelo mesmo motivo que ocorreu com ME2 na segunda semana do ensaio. Ao iniciar a quarta etapa do ensaio, todos os microtubos emissores estavam totalmente obstruídos, ou seja, microtubos com diâmetro igual ou inferior a 0,888 mm possivelmente não irão funcionar com solução que contenha areia com diâmetro superior a 100 μm (Figura 44).

Figura 44 - Vazão relativa dos microtubos emissores ao longo do tempo, com o aumento de concentração e diâmetro de partículas de areia na verificação da sensibilidade à obstrução

Ao analisar as extremidades dos microtubos emissores, verificou-se que a obstrução ocorria apenas na entrada do microtubo emissor, e para desobstruí-lo era necessário apenas remover as partículas presas no início do emissor. Isso explica porque alguns emissores voltavam a funcionar normalmente quando o sistema de irrigação era acionado.

Observou-se a presença de outros materiais com características diferentes da areia

utilizada no ensaio e que contribuíram para a obstrução dos emissores (Figura 45). Não se sabe ao certo a procedência desses materiais, possivelmente impureza da areia ou da água utilizada nos testes. Também podem ser observadas algumas partículas de areia presas à parte externa do microtubo emissor, porém em seu interior não foram encontradas partículas (Figura 45).

Figura 45 - Microtubo emissor obstruído. A - entrada do microtubo emissor; B - saída do microtubo emissor

4.3.2 Microtubos reguladores de pressão

Na primeira semana, observa-se que os MRP não obstruíram. Na segunda semana do ensaio apenas o microtubo regulador de pressão 1 (MRP1) ficou obstruído cuja a vazão foi reduzida em 48,05% após 63 horas de funcionamento do sistema. Na terceira semana os MRP funcionaram regularmente com exceção do MRP1 que ficou totalmente obstruído. Na última etapa apenas o MRP2 funcionou normalmente até o final do ensaio, ou seja, se o sistema funcionasse por um período maior ele provavelmente seria obstruído. Logo, não é recomendável utilizar microtubos com diâmetro igual ou inferior a 1,074 mm em solução que contenha areia com diâmetro superior a 100 μm (Figura 46).

Observa-se pela Figura 44 e pela Figura 46 que, de modo geral, o ME foi mais sensível ao entupimento do que o MRP. Isso era previsível pois, os microtubos estavam submetidos à mesma condição e o diâmetro do MRP é maior do que o diâmetro do ME. Porém, experimento realizado por Almeida et al. (2013) sobre susceptibilidade ao entupimento de microtubos gotejadores sob fertirrigação mostrou que o microtubo com diâmetro nominal de 1,0 mm (fornecido pelo fabricante) foi mais susceptível ao entupimento que o microtubo com diâmetro nominal de 0,8 mm. Esse resultado pode ser justificado pelo fato do diâmetro interno dos microtubos avaliados terem sido muito próximos (1,139 e 0,944

mm respectivamente).

Figura 46 - Vazão relativa dos microtubos reguladores de pressão ao longo do tempo, com o aumento de concentração e diâmetro de partículas de areia na verificação da sensibilidade à obstrução

Ao analisar as extremidades dos microtubos reguladores de pressão, verificou-se semelhança com o que ocorreu nos microtubos emissores, porém, observou-se a presença de maior quantidade de areia e de outros materiais que não puderam ser identificados (Figura 47). Supostamente o material fibroso visível na Figura 47A seja proveniente do filtro utilizado neste ensaio cujo elemento filtrante era de cordão de algodão.

Figura 47 - Microtubo regulador de pressão obstruído. A - entrada do microtubo regulador de pressão; B - saída do microtubo regulador de pressão

4.3.3 Microtubos com múltiplas saídas

Observa-se que os MMS funcionaram regularmente nas três primeiras semanas de ensaio, ao contrário dos ME e MRP que apresentaram algum problema de obstrução. Isso pode ter acontecido pelo fato das partículas de areia ficarem acumuladas no interior do conector ao invés de passar pelos microtubos emissores. No final da quarta semana o microtubo com múltiplas saídas 2 (MMS2) estava completamente obstruído e os MMS1 e MMS3 estavam com a vazão reduzida em 58,45 e 61,69% respectivamente (Figura 48). Logo, não é recomendável utilizar microtubos com múltiplas saídas (com a especificação utilizada no ensaio) em água que contenha areia com diâmetro superior a 200 μm .

Figura 48 - Vazão relativa dos microtubos com múltiplas saídas ao longo do tempo, com o aumento de concentração e diâmetro de partículas de areia na verificação da sensibilidade à obstrução

A presença de várias partículas de areia e de alguns materiais não identificados em todos os conectores pode ser visualizada na Figura 49. Portanto, as partículas de areia estavam se acumulando no conector ao invés de passarem para os microtubos emissores ligados a ela (Figura 49C). Isso pode ter favorecido para que não acontecesse a obstrução dos emissores nas três primeiras etapas do ensaio. Ressalta-se que o acúmulo de partículas de areia ocorreu nas áreas com velocidade da água no conector igual ou próxima a zero as quais foram identificadas por meio das simulações utilizando o programa computacional ANSYS Fluent. Além disso, a obstrução ocorreu apenas na entrada do microtubo emissor que estava ligado ao conector. Nenhum dos microtubos reguladores de pressão pertencentes ao MMS estavam obstruídos. Resultados semelhantes foram verificados no trabalho de Gamri et al. (2014), em

que as obstruções dos gotejadores testados ocorreram em áreas no interior do emissor com velocidade da água próxima ou igual a zero.

Apesar de ter sido o gotejador com menor sensibilidade a obstrução que os microtubos utilizados individualmente, ainda não se tem conhecimento de seu comportamento caso o ensaio tivesse prosseguido. Para Ravina et al. (1992), cada tipo de emissor possui uma sensibilidade própria ao entupimento. De acordo com os mesmos autores, emissores localizados no final da linha lateral são mais sujeitos ao entupimentos do que os emissores presentes no início da linha. Porém, os primeiros emissores obstruídos neste experimento foram os que estavam mais próximos ao início da tubulação na qual os emissores estavam conectados. Isso ocorreu, provavelmente, porque o final da linha não era fechado como ocorre normalmente nos sistemas de irrigação.

Figura 49 – Detalhes dos conectores obstruídos: Imagens obtidas com microscópio eletrônico (A, B e C), imagens obtidas com câmera digital comum (D e E)

Ao analisar a parte interna dos microtubos emissores, microtubos regulador de pressão

e dos microtubos com múltiplas saídas não foram encontrados sinais de obstrução ao longo de seu comprimento, ou seja, a obstrução ocorria apenas na entrada dos microtubos (Figura 50).

Figura 50 - Interior do microtubo

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, pôde-se chegar as seguintes conclusões:

- 1) O microtubo com múltiplas saídas é menos sensível à obstrução que os microtubos individuais com diâmetros internos de 0,888 e 1,074 mm;
- 2) O modelo utilizado nas simulações teve resultados semelhantes aos dados experimentais para número de Reynolds superior a 1534; abaixo deste valor, os resultados divergiram;
- 3) A simulação permitiu identificar as áreas críticas no conector que podem contribuir para a obstrução do emissor e os pontos que causam a maior dissipação de energia. Nas áreas mais críticas, a ocorrência de obstrução observada empiricamente foi no interior do conector, principalmente próximo às paredes e quando o fluxo ocorre em direção ao microtubo emissor onde a velocidade da água é próxima ou igual a zero;
- 4) A maior dissipação de energia foi verificada na entrada do conector e no local em que ocorre mudança de direção do fluxo; e,
- 5) Para microtubos, as equações utilizadas no cálculo do fator de atrito não apresentaram resultados satisfatórios, contradizendo às recomendações da literatura utilizadas para tubos convencionais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para pesquisas futuras, salienta-se que é necessário a realização de mais ensaios para avaliar a obstrução de microtubos utilizando partículas menores que 200 μm , além do tempo de funcionando superior a 160 h. Dessa maneira, será possível verificar o comportamento do microtubo com múltiplas saídas após o completo preenchimento de seu conector com areia.

São necessárias a realização de mudanças na geometria do conector para reduzir as zonas que favorecem a ocorrência de obstrução.

Ressalta-se a importância da realização de estudos para identificar o intervalo do número de Reynolds que classifique o regime de escoamento laminar, crítico e turbulento em microtubos. Adicionalmente, é importante a realização de ensaios com diferentes diâmetros de microtubos para verificar se o regime de escoamento, para um mesmo número de Reynolds, é modificado conforme se altera o diâmetro do microtubo.

Por fim, como os microtubos operam sob baixas pressões, seria interessante aliar o uso desta tecnologia à utilização de energia fotovoltaica, uma vez que, o requerimento energético é bem inferior aos outros sistemas de microirrigação que, do ponto de vista econômico, facilita sua utilização em locais desprovidos de rede elétrica. Destaca-se que o grupo de pesquisa do Laboratório de Hidráulica da ESALQ/USP, em conjunto com o grupo de pesquisa do Instituto de Energia e Ambiente (IEE/USP), estão trabalhando para verificar a viabilidade técnica e econômica desta tecnologia.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.C.S. **Desenvolvimento de um sistema de irrigação por microaspersão com microtubos para hortas agrícolas**. 2008. 88 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- ALMEIDA, C.D.G.C. **Microaspersor com microtubos: um novo conceito hidráulico na irrigação localizada**. 2008. 104 p. 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. Determinação do diâmetro de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, p. 413-417, 2010.
- ALMEIDA, C.D.G. C.; BOTREL, T.A.; SMITH, R.J. Characterization of the microtube emitters used in a novel micro-sprinkler. **Irrigation Science**, New York, v. 27, p. 209-214, 2009.
- ALMEIDA, C.D.G.C. de; SILVA, S.S.; ALBUQUERQUE FILHO, J.A.C. de; SILVA, E.F.F. Susceptibilidade ao entupimento de microtubos gotejadores sob fertirrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 454-470, jul./set. 2013.
- ALVES, D.G. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação com ultra baixa vazão utilizando microtubos ramificados**. 2010. 86 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- ALVES, D.G.; PINTO, M.F.; SALVADOR, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; ALMEIDA, C.D.G.C. de; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de um sistema de microirrigação utilizando microtubos ramificados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 125-132, fev. 2012.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ASABE. **ASAE EP405.1**: design and installation of microirrigation systems. St. Joseph, 2010. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR ISO 9261**: equipamentos de irrigação agrícola. Emissores e tubos emissores. Especificação e métodos de ensaio. São Paulo, 2006. 17 p.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de R.S. Gheyi, J.F. de Medeiros, F.A.V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 revisado 1).
- AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDEZ, M.F.; ARAÚJO, R.; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: ed. UFV, 2006. 625 p.

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

BUCKS, D.A.; NAKAYAMA, F.S.; GILBERT, R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 2, p. 149-162, 1979.

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

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

DURAN-ROS, M.; PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R. de. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 67-79, 2009.

FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L. de; REZENDE, R.; FARIA, M.A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356 p.

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

GAMRI, S.; SORIC, A.; TOMAS, S.; MOLLE, B.; ROCHE, N. Biofilm development in micro-irrigation emitters for wastewater reuse. **Irrigation Science**, New York, v. 32, n. 1, p. 77-85, Jan. 2014.

GILBERT, R.G.; FORD, H.W. Emitter clogging. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier Science, 1986. chap. 3, p. 142-163.

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

GOMES, A.W.A.; FRIZZONE, J.A.; RETTORE NETO, O.; MIRANDA, J.H. Perda de carga localizada em gotejadores integrados em tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n.3, p. 435-446, 2010.

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES POUR L'ENVIRONNEMENT ET L'AGRICULTURE. IRSTEA. Disponível em: <<http://www.irstea.fr/sites/default/files/ckfinder/userfiles/files/procedure%20essais%20micro%20irrigation.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2006: agricultura familiar**. Rio de Janeiro, 2006. 267 p.

KANDILIKAR, S.G.; JOSHI, S.; TIAN, S. Effect of surface roughness on heat transfer and fluid flow character at low Reynolds numbers in small diameter tubes. **Heat Transfer Engineering**, Washington, v. 24, n. 3, p. 4-16, 2003.

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

KREIJ, C. DE; VAN DER BURG, A.M.M.; RUNIA, W.T. Drip irrigation emitter clogging in Dutch greenhouses as affected by methane and organic acids. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 60, p. 73-85, 2003.

LI, J.; LI, Y.; ZHANG, H. Tomato yield and quality and emitter clogging as affected by chlorination schemes of drip irrigation systems applying sewage effluent. **Journal of Integrative Agriculture**, Amsterdam, v. 11, n. 10, p. 1744-1754, 2012.

MEHMOOD, A.; WASY, A.; WAQAS, A.; SONG, J. Development and computational flow analysis of GSM based automated solar water pump. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE & STRENGTH OF SOLIDS, 9., 2013, Jeju. **Proceedings...** Jeju: FEOFS, 2013. p. 1-8.

OLIVEIRA, C.A.S. **Hidráulica de gotejadores e de linhas laterais para Irrigação por gotejamento**. 1978. 72 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1978.

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

PESCOD, M.D. **Wastewater treatment and use in agriculture**. Rome: FAO, 1992. 125 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 47).

PINTO, M. F.; ALVES, D. G.; BOTREL, T. A. Influência da temperatura no desempenho de microtubos spaghetti. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 1 & WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO, 4, 2012, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2012. p. 1-5.

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

PLASNOVA LOUVEIRA IND. COM. LTDA. Disponível em: <http://www.plasnovatubos.com.br/microjet_spaghetti.html>. Acesso em: 04 mar. 2014.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: USP, EESC, 2006. 540 p.

PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT G.; ELBANA, M.; DURAN-ROS, M.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R. de, LAMM, F.R. Effect of flushing frequency on emitter clogging in

microirrigation with effluents. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 883-891, 2010.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, New York, v. 13, p. 129-139, 1992.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G.; YECHIALY, Z.; LEV, Y. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 33, p. 127-137, 1997.

RIBEIRO, T.A.P.; AIROLDI, R.P.S.; PATERNIANI, J.E.S.; SILVA, M.J.M. da. Variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 295-301, 2005.

SWAMEE, P. K. Design of a submarine oil pipeline. **Journal of Transportation Engineering**, New York, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.

SEYEDASHRAF, O.; AKHTARI, A.A.; SHAHIDI, M.K. Numerical study of channel convergence effects on flow pattern in 90 degree bends. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON CIVIL ENGINEERING, 9., 2012, Isfahan. **Proceedings...** Isfahan: Isfahan University of Technology, 2012. p. 1-8.

SILVA, K.B. da; BATISTA, R.O.; SILVA, S.K.C.; DIAS, N.S.; COSTA, M.S. Efeito de distintas pressões de serviço na determinação da vazão em sistemas de irrigação por gotejamento operando com efluentes do processamento da castanha de caju. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 8, n. 4, p. 89-96, out./dez. 2012.

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

SOUZA, J.A.A. de; CORDEIRO, É.A.; COSTA, É.L. da. Aplicação de hipoclorito de sódio para recuperação de gotejadores entupidos em irrigação com água ferruginosa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 5-9, 2006.

SOUZA, J.A.R. de; MOREIRA, D.A. Efeitos da aplicação de esgoto sanitário submetidos a diferentes níveis de tratamento em sistemas de irrigação localizada. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 2, p. 145-158, abr/ jun. 2012.

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

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

- SOUZA, R.O.R.M.; PÉREZ, G.F.E.; BOTREL, T.A. Irrigação localizada por gravidade com microtubos. **Irriga**, Botucatu, v. 11, p. 266-279, 2006.
- SOUZA, R.O.R.M.; MIRANDA, E.P.; NASCIMENTO NETO, J.R.; FERREIRA, T.T.S.; MESQUITA, F.P. Irrigação localizada por gravidade em comunidades agrícolas do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, p. 34-40, 2009.
- SOUZA, W.J. **Escoamento em regime turbulento aplicado à irrigação localizada com microtubos**. 2008. 117 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- SOUZA, W.J.; BOTREL, T.A.; ALMEIDA, A.C.S.; CORREA, C.B. Modelo matemático aplicado à irrigação localizada com microtubos sob regime de escoamento turbulento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, p. 278-289, 2011.
- SOUZA, W.J.; BOTREL, T.A.; COELHO, R.D.; NOVA, N.A.V. Irrigação localizada subsuperficial: Gotejador convencional e novo protótipo. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 811-819, 2012.
- TAJRISHY, M.A.; HILLS, D.J.; TCHOBANOGLIOUS, G. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 120, n. 4, p. 716-731, July/Aug. 1994.
- VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Irrigação localizada**. Tradução de H.R. Gheyi et al. Campina Grande: UFPB, 1997. 184 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).
- WEI, Q.; SHI, Y.; DONG, W.; LU, G.; HUANG, S. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 84, p. 130-136, 2006b.
- WEI, Q.; SHI, Y.; LU, G.; DONG, W.; HUANG, S. Study of hydraulic performance of the eddy channel for drip emitters. **Irrigation and Drainage**, New York, v. 55, p. 61-72, 2006a.
- WEI, Q.; LU, G.; LIU, J.; SHI, Y.; DONG, W.; HUANG, S. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 63, p. 294-303, 2008.
- WU, D.; AU-LI, Y.; LIU, H.; YANG, P.; SUN, H.; LIU, Y. Simulation of the flow characteristics of a drip irrigation emitter with large eddy methods. **Mathematical and Computer Modelling**, Oxford, v. 58, n. 3/4, p. 497-506, Aug. 2013.
- XU, B.; OOI, K.T.; WONG, N.T.; CHOI W.K. Experimental investigation of flow friction for liquid flow in microchannels. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, New York, v. 27, n. 8, p. 1165-1176, 2000.
- ZITTERELL, D.B.; FRIZZONE, J.A.; RETTORE NETO, O.; ULLMANN, M.N. Perda de carga em microtubos e conectores utilizados em microaspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 591-604, 2009.

APÊNDICE

APÊNDICE: Modelo laminar

O perfil de velocidade e as linhas de fluxo podem ser visualizados na Figura 51 a Figura 53. Porém, é importante salientar que os resultados dessa simulação foram diferentes dos resultados obtidos experimentalmente, indicando que o modelo laminar não é apropriado.

Figura 51 - Campo de velocidade (m s^{-1}) obtido pelo modelo laminar para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - plano horizontal; B - plano vertical

Figura 52 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo laminar para vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - localizadas a $0,25 \text{ mm}$ da base do conector; B - localizadas a $2,25 \text{ mm}$ da base do conector; C - localizadas a $1,25 \text{ mm}$ da base do conector A escala de cores representa o valor da velocidade

Figura 53 - Linhas de fluxo obtidas pelo modelo laminar no plano vertical do conector e vazão de $2,46 \text{ L h}^{-1}$. A - entrada do conector; B - parte basal do conector A escala de cores representa o valor da velocidade