

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

Relações entre características geométricas de gotejadores e dinâmica de
obstrução

Rogério Lavanholi

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

Piracicaba
2019

Rogério Lavanholi
Engenheiro Agrícola

Relações entre características geométricas de gotejadores e dinâmica de obstrução
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2019

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

Lavanholi, Rogério

Relações entre características geométricas de gotejadores e dinâmica de obstrução / Rogério Lavanholi. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

106 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Irrigação localizada 2. Partículas sólidas 3. Deposição de partículas 4. Características de escoamento 5. Desempenho antiobstrução I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antônio Lavanholi e Clenir Belone Lavanholi

À minha irmã Cristina Lavanholi

Ao meu irmão Douglas Antônio Lavanholi

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as bênçãos nos momentos de dificuldade.

À minha família, por todo incentivo que me foi dado ao longo dessa caminhada.

Ao professor José Antônio Frizzone pela orientação e pela confiança depositada em mim.

Ao professor Antônio Pires de Camargo, por toda ajuda e apoio essenciais para que o projeto pudesse ser realizado.

À toda equipe do laboratório (LEMI) e irmãos de orientação, por contribuírem com as atividades técnicas e pela amizade: Ana Cláudia Sátiro Araujo, Diego José de Sousa Pereira, Eric Alberto da Silva, Fabricio Correia de Oliveira, Hermes Soares da Rocha, José Eustáquio Campos Junior, Luiz Sobenko, Marcus Vinicius Talamini Junior, Wagner Ávila Bombardelli, e Veronica Martins.

Aos amigos e colegas de Pós-Graduação e república pelos bons momentos vividos e pelo apoio durante minha permanência em Piracicaba.

À todos meus professores que participaram na construção do meu conhecimento durante o curso de doutorado.

Aos funcionários e professores da ESALQ pelo auxílio e disponibilidade.

À equipe francesa (IRSTEA) pela orientação e suporte técnico: Nassim Ait Mouheb, Séverine Tomas e Bruno Molle.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade, estrutura e suporte técnico oferecidas para realização do curso e da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio de bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), 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).

Ao programa USP-COFECUB (Programa de Cooperação Acadêmica entre pesquisadores franceses e brasileiros - Projeto nº 2015-3).

EPÍGRAFE

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1. Irrigação por gotejamento	15
2.2. Emissores utilizados em sistemas de irrigação por gotejamento.....	15
2.3. Obstrução dos gotejadores	18
2.4. Obstrução de natureza física	19
2.5. Regime de escoamento nos labirintos de emissores.....	22
2.6. Efeito das características construtivas dos canais nas propriedades de fluxo e desempenho hidráulico dos emissores.....	23
2.7. Relação entre as características construtivas dos labirintos e obstrução dos emissores	27
2.8. Características de movimentação de partículas sólidas em labirintos	29
2.9. Análise numérica de fluxo	32
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1. Características geométricas dos labirintos dos protótipos.....	35
3.2. Projeto dos labirintos dos emissores	36
3.2.1. Estudos preliminares da simulação numérica de fluxo.....	39
3.2.1.1. Determinação do número de defletores a ser utilizado para simulação	39
3.2.1.2. Determinação da malha adequada para simulação numérica.....	40
3.3. Fabricação dos protótipos de emissores	42
3.4. Experimentos para avaliação hidráulica dos emissores	43
3.5. Modelagem da vazão dos emissores por regressão não linear	44
3.6. Ensaio de obstrução.....	45
3.6.1. Bancada de ensaio	45
3.6.2. Partículas sólidas utilizadas para os ensaios de obstrução.....	46
3.6.3. Condução do ensaio de obstrução	48
3.7. Avaliação de desempenho dos protótipos de emissor	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1. Características do escoamento no canal dos labirintos	51
4.2. Distribuição de pressão no labirinto.....	63
4.3. Efeito da estrutura do canal no comprimento do labirinto	65
4.4. Efeito das características construtivas na relação vazão - pressão	70
4.4.1. Emissores com escoamento uniforme	70
4.4.2. Emissores com vórtice no canal (EV)	74
4.5. Modelo matemático para estimativa da vazão dos protótipos, baseado em regressão	78
4.6. Sensibilidade à obstrução dos emissores EU	80
4.7. Sensibilidade à obstrução dos emissores EV	83
4.7.1. Deposição de partículas no interior dos labirintos dos gotejadores EV.....	85
4.8. Ensaio de obstrução prolongado	92
5. CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE	105

RESUMO

Relações entre características geométricas de gotejadores e dinâmica de obstrução

A obstrução de natureza física é ocasionada por partículas sólidas presentes em suspensão na água de irrigação e tem sido apontada como a mais comum entre os tipos de obstrução. A suscetibilidade dos gotejadores a problemas de obstrução é influenciada pela qualidade da água e por características geométricas do canal de escoamento do gotejador. Normalmente locais com baixa velocidade de escoamento, como as regiões de estagnação de fluxo e o centro de vórtices, proporcionam baixa capacidade de sustentação das partículas, o que favorece a sedimentação e acúmulo de sedimentos no canal, favorecendo a obstrução do emissor. Este trabalho teve como objetivo investigar a relação entre características geométricas de gotejadores e as características de escoamento no labirinto com seu desempenho hidráulico e a dinâmica da obstrução causada por partículas sólidas, a fim de adquirir fundamentos para suporte ao aprimoramento de geometrias de labirintos de emissores. Para isso foram projetados, desenvolvidos e avaliados dois grupos de protótipos de labirintos com características construtivas que conduzem a condições de escoamento distintas. No primeiro grupo os labirintos apresentaram escoamento uniforme (EU) apresentando geometria e características de escoamento que minimizam zonas de vórtice, comparando canais com diferentes seções de escoamento e ângulos de defletores. No segundo, os labirintos foram desenvolvidos para favorecer a formação de vórtices bem desenvolvidos (EV) por meio de alterações na altura dos defletores e na largura do canal. Alterações nos parâmetros construtivos dos labirintos resultaram em variações significativas na magnitude da perda de carga e no expoente de fluxo dos labirintos. Os emissores com características geométricas que favoreceram a formação de vórtices bem desenvolvidos apresentaram maior potencial de perda de carga e menores expoente de fluxo comparado aos emissores que permitem escoamento com características mais uniformes no canal. Em relação ao desempenho antiobstrução observou-se que a seção do canal foi um fator limitante, sendo que para ambas as etapas, emissores com largura de canal inferior a 0,8 mm, foram obstruídos rapidamente por partículas relativamente grandes. Por outro lado, os emissores com largura de canal igual ou superior a 1,0 mm não foram sensíveis à obstrução. Os resultados indicaram que a adoção dos vórtices bem desenvolvidos nos labirintos é benéfica do ponto de vista de desempenho hidráulico e antiobstrução pois permite a construção de labirintos com canais mais largos e mais curtos, além de não favorecerem a sedimentação de partículas ao longo do canal nas condições estudadas.

Palavras-chave: Irrigação localizada, Partículas sólidas, Deposição de partículas, Características de escoamento, Desempenho antiobstrução

ABSTRACT

Relationship between geometric characteristics of drippers and clogging dynamics

Clogging of physical nature is caused by solid particles present in suspension in irrigation water and has been pointed out as the most common type of clogging. The susceptibility of the drippers to clogging problems is influenced by the water quality and geometric characteristics of the drip channel of the dripper. Usually low flow velocity sites, such as the regions of flow stagnation and the center of vortices, provide low particle support capacity, which favors sedimentation and sediment accumulation in the channel, favoring the emitter clogging. This study aimed to investigate the relationship between geometrical characteristics of drip and flow characteristics in the labyrinth with its hydraulic performance and dynamics of the clogging caused by solid particles in order to acquire fundamentals to support the enhancement of emitters labyrinth geometries. For this, two groups of labyrinth prototypes with constructive characteristics were designed, developed and evaluated that lead to different flow conditions. In the first group the labyrinths presented uniform flow (EU) presenting geometry and flow characteristics that minimize vortex zones, comparing channels with different flow sections and deflector angles. In the second the labyrinths were developed to favor the formation of well developed vortices (EV) by means of changes in the height of the baffles and the width of the channel. Changes in the constructive parameters of the labyrinths resulted in significant variations in the magnitude of the head loss and the exponent of flow of the labyrinths. The emitters with geometric characteristics that favored the formation of well developed vortices presented greater potential of head loss and smaller exponent of flow compared to the emitters that allow flow with more uniform characteristics in the channel. Regarding the anti-clogging performance, it was observed that the section of the channel was a limiting factor, and for both steps, emitters with channel width less than 0.8 mm, were obstructed by relatively large particles. On the other hand, the emitters channel width exceeding 1.0 mm were not sensitive to clogging. The results indicated that the adoption of well developed vortices in the labyrinths is beneficial from the point of view of hydraulic performance and anti-obstruction because it allows the construction of labyrinths with wider and shorter channels, besides not favoring the sedimentation of particles along the channel in the conditions studied.

Keywords: Micro irrigation, Solid particles, Deposition of particles, Flow characteristics, Anti-clogging performance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de gotejadores utilizados na irrigação localizada: gotejador <i>on-line</i> (a), gotejador <i>in-line</i> (b), gotejador integrado tipo cilíndrico (c), gotejador integrado tipo plano (d) (ARAUJO, 2019).....	16
Figura 2. Exemplo de relações vazão-pressão para emissores de fluxo laminar ($x = 1,0$), turbulento ($x = 0,5$), emissor tipo vórtice ($x = 0,4$), e autocompensantes ($x \rightarrow 0$).....	18
Figura 3. Distribuição das linhas de fluxo que no interior dos labirintos de gotejadores destacando-se as três regiões de escoamento (a, região de estagnação; b, região de vórtice; c, região do fluxo principal) (Zhang et al., 2010).....	24
Figura 4. Parâmetros estruturais dos labirintos, sendo W a largura do canal, W_1 a largura total do labirinto, e θ o ângulo do defletor dos labirintos retangular (a), trapezoidal (b) e triangular (c) estudados por Wei et al. (2006).....	24
Figura 5. Características geométricas do labirinto de formato triangular avaliado por Li et al. (2006).....	25
Figura 6. Parâmetros dimensionais e características geométricas dos labirintos (Zhang; Zhao; lu, 2013).....	25
Figura 7. Representação do ângulo do defletor adotado por Yu et al., (2018c).....	26
Figura 8. Parâmetros geométricos dos labirintos estudados por Dazhuang et al. (2007).....	26
Figura 9. Trajetórias de partículas, obtidas numericamente, no canal do labirinto trapezoidal: (a) partícula com diâmetro de $5\mu\text{m}$; (b) partícula com um diâmetro de $50\mu\text{m}$; e (c) partículas com um diâmetro de $300\mu\text{m}$ (Jun et al., 2007).....	30
Figura 10. (a) parâmetros geométricos dos protótipos do grupo eu: largura do canal (W), profundidade do canal (D_d), altura do defletor (H), ângulo do defletor (α); (b) dimensões adotadas no projeto dos protótipos do grupo EU.....	36
Figura 11. Parâmetros geométricos dos protótipos do grupo EV: largura do canal (W), profundidade do canal (D), altura do defletor (H), ângulo do defletor (α).....	36
Figura 12. Indicação do local onde foram plotados o perfil de velocidade de escoamento no primeiro ($L1$) e no quinto defletor ($L5$) dos emissores EV (a) e EU (b).....	40
Figura 13. Teste de independência de malha para a geometria ev com largura de canal de $1,3\text{ mm}$ e relação H/W $1,0$ no defletor 1 (a) e defletor 5 (b).....	41
Figura 14. Teste de independência de malha para a geometria eu com largura de canal de $0,5\text{ mm}$ e ângulo de defletor de 45° no defletor 1 (a) e defletor 5 (b).....	41
Figura 15. Fresadora cnc utilizada para confecção dos canais do labirinto (a), fresa e esquema de fixação da placa de acrílico na mesa da cnc durante o processo de usinagem.....	42
Figura 16. Representação esquemática das peças utilizadas no acessório (a): parafuso (1), armação metálica (2), tubo de nylon (3), placa de silicone (4), folha de papel alumínio (5), placa de silicone (6), placa contendo o labirinto (7), placa de vidro (8), porcas (9); e acessório montado para execução do ensaio (b).....	43
Figura 17. Representação da bancada de ensaio utilizada para determinação da relação vazão-pressão dos protótipos: reservatório (1), conjunto motobomba (2), filtro de disco (3), registros tipo agulha para controle do retorno de água e para ajuste da pressão de ensaio (4), manômetro digital (5), protótipos (6) e coletores (7).....	44
Figura 18. Bancada de ensaio com reservatório (1), agitador mecânico (2), conjunto motobomba (3), registro de gaveta e entrada de água para a linha dos gotejadores (4), manômetro (5), kit com microscópio e câmera para visualização do labirinto (6), gotejadores (7), calha para retorno da água ao reservatório (8), bocal para controle da velocidade de escoamento da água no tubo (9), peneira para retenção de contaminantes (10).....	46
Figura 19. Curva de distribuição granulométrica do material de obstrução utilizado para os ensaios experimentais.....	48
Figura 20. Campo de velocidade média (m s^{-1}) e as linhas de corrente no quinto defletor para os emissores EU obtidas pela simulação numérica.....	51

Figura 21. Campo de velocidade ($m s^{-1}$) e as linhas de corrente na quinta unidade defletora para os emissores EV obtidas pela simulação numérica	52
Figura 22. Regiões formadora de vórtices delimitadas nos labirintos com largura de canal de 1,3 mm para as relações H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)	53
Figura 23. Indicação do local onde foram plotados o perfil de velocidade de escoamento no quinto defletor (L5) dos emissores EU	54
Figura 24. Perfil do módulo da velocidade de escoamento na linha do defletor 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,5 mm (a), 0,6 mm (b), 0,7 mm (c), e 0,8 mm (d)	55
Figura 25. Indicação do local onde foram plotados o perfil de velocidade de escoamento no quinto defletor (L15) dos emissores EV	55
Figura 26. Perfil da velocidade de escoamento no quinto defletor dos emissores EV	56
Figura 27. Campo de velocidade média ($m s^{-1}$) e as linhas de corrente nos quatro primeiros defletores para os emissores EU com largura de canal de 0,7 mm	57
Figura 28. Campo de velocidade média ($m s^{-1}$) e as linhas de corrente nos quatro primeiros defletores para os emissores EV com largura de canal de 1,0 mm	57
Figura 29. Indicação dos locais onde foram plotados os perfis de velocidade de escoamento nos emissores EV no defletor 1 (L1), defletor 2 (L2), defletor 3 (L3), e defletor 5 (L5)	58
Figura 30. Perfil de velocidade de escoamento nos defletores 1, 2, 3, e 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,5 mm com ângulo do defletor de 45°(a), 60° (b), 75° (c)	59
Figura 31. Perfil de velocidade de escoamento nos defletores 1, 2, 3, e 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,6 mm com ângulo do defletor de 45°(a), 60° (b), 75° (c)	59
Figura 32. Perfil de velocidade de escoamento nos defletores 1, 2, 3, e 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,7 mm com ângulo do defletor de 45°(a), 60° (b), 75° (c)	60
Figura 33. Perfil de velocidade de escoamento nos defletores 1, 2, 3, e 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,8 mm com ângulo do defletor de 45°(a), 60° (b), 75° (c)	60
Figura 34. Indicação dos locais onde foram plotados os perfis de velocidade de escoamento nos emissores EV sendo defletor 1 (I1), defletor 2 (I2), defletor 3 (I3), e defletor 5 (I5)	61
Figura 35. Perfil de velocidade de escoamento nas linhas do defletor 1, 2, 3, e 5 dos emissores EV com largura de canal de 0,7 mm com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)	61
Figura 36. Perfil de velocidade de escoamento nas linhas do defletor 1, 2, 3, e 5 dos emissores EV com largura de canal de 1,0 mm com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)	62
Figura 37. Perfil de velocidade de escoamento nas linhas do defletor 1, 2, 3, e 5 dos emissores EV com largura de canal de 1,3 mm com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)	62
Figura 38. Evolução da pressão estática (kPa) obtidos a partir da simulação numérica de fluxo ao longo dos 8 defletores dos emissores EU (a) e EV (b)	63
Figura 39. Distribuição de pressão (kPa) no quinto defletor dos emissores EU com w de 0,5 mm com ângulo de 45° (a), 60° (b) e 45° (c)	64
Figura 40. Distribuição de pressão (kPa) no quinto defletor dos emissores EV com w de 1,3 mm e relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c) e 1,6 (d)	64
Figura 41. Efeito do aumento da razão H/W na redução do comprimento do labirinto para as larguras (W) estudadas no grupo de emissores EV	69
Figura 42. Curva vazão-pressão dos emissores de canal com largura de 0,5 mm e com ângulo de 45 (a), 60 (b), e 75 (c)	70
Figura 43. Curva vazão-pressão dos emissores de canal com largura de 0,6 mm com ângulo de 45 (a), 60 (b), e 75 (c)	71

Figura 44. Curva vazão-pressão dos emissores de canal com largura de 0,7 mm e com ângulo de 45 (a), 60 (b), e 75 (c).....	71
Figura 45. Curva vazão-pressão dos emissores de canal com largura de 0,8 mm e com ângulo de 45 (a), 60 (b), e 75 (c).....	72
Figura 46. Curva vazão-pressão dos emissores EV de canal com largura de 0,7 mm e com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)	74
Figura 47. Curva vazão-pressão dos emissores EV com largura de canal de 1,0 mm e com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)	75
Figura 48. Curva vazão-pressão dos emissores ev com largura de canal de 1,3 mm e com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)	75
Figura 49. Valores de vazão observados versus estimados (a); análise gráfica do erro apresentando erro relativo (δ) versus frequência do erro na predição da vazão ($\delta = 100\text{observado} - \text{estimadoobservado}$).....	79
Figura 50. Vazão relativa do emissor com largura de 0,8 mm e ângulo de defletor de 75° ao longo das 40 h de ensaio	80
Figura 51. Canal de escoamento dos protótipos de emissores do grupo eu obstruídos por partículas com dimensões superiores à largura do canal ou por obstrução em arco	81
Figura 52. Fases da obstrução causada por partículas com dimensões superiores ao do canal do labirinto, sendo início da obstrução (a); acúmulo de partículas (b) e obstrução completa (c)	82
Figura 53. Efeito das diferentes relações H/W na vazão relativa para os protótipos com largura de canal de 1,3 mm ao longo dos 5 dias de ensaio na repetição 1 (a) e repetição 2 (b).....	84
Figura 54. Efeito das diferentes relações H/W na vazão relativa para os protótipos com largura de canal de 1,0 mm ao longo dos 5 dias de ensaio na repetição 1 (a) e repetição 2 (b).....	84
Figura 55. Vazão relativa para os protótipos com H/W largura de canal de 0,7 mm com relação H/W de 1,4 e 1,6 ao longo dos 5 dias de ensaio.....	85
Figura 56. Imagens do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,3 mm para as quatro relações H/W estudadas obtidas após 8, 24, e 40 h de funcionamento	86
Figura 57. Imagens do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,0 mm para as quatro relações H/W estudadas obtidas após 8, 24, e 40 h de funcionamento	87
Figura 58. Imagens do quinto defletor dos labirintos com largura de canal de 1,3 mm com relação H/W de 1,0 (a); 1,2 (b); 1,4 (c); e 1,6 (d)	88
Figura 59. Emissores ev com largura de canal de 0,7 mm com relação H/W de 1,0 (a); 1,2 (b); 1,4 (c); e 1,6 (d) obstruídos por partículas solidas.....	92
Figura 60. Efeito do tempo de exposição prolongado na vazão relativa dos protótipos com largura de canal de 1,0 e 1,3 mm com relação H/W 1,6.....	93
Figura 61. Imagens do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,3 mm e relação H/W 1,6 a cada 40 horas de funcionamento	93
Figura 62. Imagens do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,0 mm e relação H/W 1,6 a cada 40 horas de funcionamento	94
Figura 63. Desenvolvimento de biofilme no quinto defletor do labirinto com largura de canal de 1,0 mm (a) e 1,3 mm (b) com relação H/W de 1,6 após 240 h de funcionamento	95
Figura 64. Deposição de partículas no início do labirinto com largura de canal de 1,3 mm e relação H/W de 1,6 antes (a) e depois (b) de iniciar os testes de 240 h	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação da qualidade da água, relativa ao potencial de obstrução de gotejadores	19
Tabela 2. Parâmetros estruturais dos labirintos estudados por Wei et al. (2006).....	25
Tabela 3. Parâmetros estruturais dos labirintos estudados por Dazhuang et al. (2007)	27
Tabela 4. Teste do número de defletores a ser utilizado na fase de simulação para estimar o comprimento total do labirinto.....	39
Tabela 5. Faixas granulométricas utilizadas no experimento	47
Tabela 6. Peneiras utilizadas para separação dos intervalos de diâmetro de partículas e contribuição de cada intervalo na composição da faixa granulométrica do material nos ensaios de obstrução	48
Tabela 7. Distribuição da concentração das faixas granulométricas em cada etapa	49
Tabela 8. Perda de carga em cada unidade defletora obtida por simulação numérica para o emissor EU (largura de canal de 0,5 mm e ângulo de defletor de 45°), e emissor EV (largura de canal de 1,3 mm e relação H/W de 1,0) 64	
Tabela 9. Características geométricas dos protótipos do grupo EU e coeficiente de perda de carga no defletor dos labirintos (φ)	65
Tabela 10. Representação esquemática dos protótipos de emissores EU	66
Tabela 11. Características geométricas dos protótipos do grupo EV e coeficiente de perda de carga no defletor dos labirintos (φ)	67
Tabela 12. Representação esquemática dos protótipos de emissores EV	68
Tabela 13. Erro relativo entre os valores de vazão experimentais e simulados para as diferentes pressões avaliadas	72
Tabela 14. Parâmetros da equação característica do emissor, vazão determinada na pressão de 100 kPa e erro relativo (er) entre valores de expoente de fluxo obtidos experimentalmente e pela simulação numérica para os emissores EU	73
Tabela 15. Erro relativo entre os valores de vazão experimentais e simulados nas diferentes pressões avaliadas para os emissores EV	76
Tabela 16. Parâmetros da equação característica do emissor, vazão determinada na pressão de 100 kPa e erro relativo (ER) entre valores de expoente de fluxo obtidos experimentalmente e pela simulação numérica para os emissores EV	77

1. INTRODUÇÃO

A obstrução de gotejadores tem sido reportada como um dos principais problemas do sistema de irrigação por gotejamento, resultando no aumento dos custos de manutenção, redução da uniformidade de aplicação de água e comprometimento da vida útil dos equipamentos, sendo a obstrução, na maioria das vezes, um processo irreversível. Este problema tem como origem a ação individual ou combinada de agentes de natureza química, biológica ou física, sendo essa última apontada como a mais comum entre os tipos de obstrução (LI et al., 2012b).

A utilização de água de baixa qualidade associada as características geométricas dos emissores são os principais fatores pelo qual ocorre a obstrução em gotejadores. A maioria dos gotejadores empregados em sistemas de microirrigação utilizam labirintos como mecanismo de dissipação de energia. Esses dispositivos apresentam eficiente controle da vazão e são capazes de proporcionar elevada uniformidade na distribuição de água ao longo das linhas laterais, sendo atualmente os mais empregados pela indústria devido sua construção compacta, estrutura simples, e baixo custo de produção. As principais características desses dispositivos consistem na presença de caminhos tortuosos e de dimensões reduzidas. Para obter baixa vazão, a maioria dos emissores comerciais adotam canais com uma seção de fluxo pequena, o que aumenta a vulnerabilidade dos emissores ao problema de obstrução.

A maioria dos labirintos são projetados com formatos geométricos que possibilitem a formação de vórtices, os quais são responsáveis por aumentar a perda de carga e reduzir a vazão, permitindo a construção de labirintos com comprimentos menores e com menor custo de produção. Os principais fatores que determinam as características de escoamento e a magnitude dos vórtices são as características geométricas do canal, ou seja, as dimensões e o arranjo arquitetônico com que os labirintos são projetados (FENG et al., 2017).

Se do ponto de vista hidráulico os vórtices desempenham um papel importante no controle da vazão, do ponto de vista de resistência à obstrução há divergências na literatura, sendo que os vórtices podem ser indesejáveis. Vórtices constituem regiões de baixa velocidade de escoamento nas quais há a possibilidade de deposição e o acúmulo de sedimentos (ZHANG et al., 2010). O acúmulo de sedimentos no interior de labirintos causa redução da seção de escoamento, diminuindo a vazão do emissor ou até mesmo interrompendo por completo o fluxo de água.

Durante o projeto de emissores utilizados em sistemas de irrigação por gotejamento, é importante que as características geométricas dos labirintos assegurem um bom desempenho hidráulico, no entanto, é necessário também que os aspectos de desempenho em condições de risco de obstrução sejam considerados. Embora os parâmetros geométricos e os fenômenos hidráulicos que ocorrem no interior do labirinto que afetam a sensibilidade dos emissores à obstrução sejam conhecidos, não há ainda um entendimento consolidado sobre como a combinação entre esses fatores interferem no desempenho dos gotejadores quando submetidos a condições de operações adversas. As principais dificuldades em se obter essas

informações se devem pelas pequenas dimensões dos labirintos e pela complexidade das relações entre qualidade da água, geometria de emissores e processos de obstrução.

Como hipóteses dessa pesquisa, considerando que a obstrução de fato ocorre com mais frequência devido ao acúmulo de partículas em regiões de vórtices e de baixa velocidade, supõe-se que para minimizar problemas de obstrução em gotejadores é preciso minimizar zonas de vórtices no interior do labirinto. Contudo, devido ao baixo desempenho hidráulico pela ausência dos vórtices, essa concepção de projeto resulta em labirintos com seção de escoamento relativamente pequena e/ou comprimento de labirinto relativamente longo, o que pode aumentar a vulnerabilidade do emissor ao problema de obstrução. Por outro lado, embora vórtices possam favorecer o acúmulo de partículas, esse mecanismo possibilita a fabricação de labirintos com seção de escoamento maior e comprimento de labirinto menor, devido ao maior desempenho hidráulico que estes mecanismos proporcionam. Se as dimensões da seção de escoamento forem uma variável dominante no processo de resistência a obstrução por partículas sólidas, supõe-se que um labirinto que apresenta canal com grandes seções mostra-se menos sensível a obstrução, mesmo em condições onde os vórtices são bem desenvolvidos no labirinto.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a relação entre características geométricas de gotejadores e as características de escoamento no labirinto com seu desempenho hidráulico e a dinâmica da obstrução causada por partículas sólidas. Buscou-se compreender como as características geométricas do labirinto e as características de escoamento influenciam na sensibilidade de emissores à obstrução, por meio de avaliações que possibilitassem a identificação de regiões de acúmulo de partículas e obstrução dos labirintos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação por gotejamento

O sistema de irrigação por gotejamento está inserido no método de irrigação localizada e consiste no fornecimento de água para as plantas diretamente na região do sistema radicular. Esse sistema é característico por apresentar uma rede de tubos distribuído pela área irrigada, responsáveis por distribuir e aplicar a água em baixa vazão e alta frequência, e quando bem manejada, mantém a umidade do solo próximo às condições ideais de cultivo (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

A irrigação por gotejamento tem como principais vantagens elevada uniformidade de distribuição de água e eficiência de aplicação, baixa demanda energética, possibilidade de aplicações de fertilizantes via água de irrigação (BORSSOI et al., 2012; LI et al., 2012b; WU, 1997), e baixa perda de água por evaporação (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Contudo, a expansão de áreas irrigadas por esse sistema ainda é limitada devido ao elevado custo de aquisição e a maior demanda de conhecimento técnico para operação, principalmente devido a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade da água utilizada (FRIZZONE et al., 2012).

Em termos de desempenho, a uniformidade de distribuição de água no sistema de irrigação por gotejamento é um dos parâmetros de maior importância, devendo ser continuamente monitorada. Grandes variações de vazão ao longo das linhas laterais ou nas parcelas podem interferir no fornecimento de água às plantas, assim como de nutrientes durante o processo de fertirrigação. A origem dessas variações está associada à temperatura da água, pressão de operação, fabricação do emissor, variações topográficas, perda de carga na linha lateral, e obstrução de emissores (VEKARIYA; SUBBAIAH; MASHRU, 2011). Dentre elas a obstrução é reportada como uma das maiores responsáveis pela redução da uniformidade de distribuição de água, assim como pelo comprometimento da vida útil dos equipamentos (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979; DE CAMARGO et al., 2014).

2.2. Emissores utilizados em sistemas de irrigação por gotejamento

Os emissores, também chamados de gotejadores, são uns dos principais componentes dos sistemas de irrigação por gotejamento. Estes dispositivos são instalados ao longo de tubos de polietileno, denominados de linhas laterais, e são responsáveis por dissipar a energia de pressão e controlar a vazão aplicada. Os gotejadores são projetados para fornecerem vazões relativamente baixas, geralmente inferior a 12 L h^{-1} , e operam sob pressão na faixa de 30 e 450 kPa (FRIZZONE et al., 2012).

Gotejadores podem receber diversas classificações sendo a principal delas relacionada à geometria do emissor (FRIZZONE et al., 2012):

- Gotejador com orifício de saída: nestes emissores a perda de carga ocorre devido a passagem de água através de um ou mais orifícios de pequenas dimensões. São característicos por

apresentaram regime de fluxo completamente turbulento, no entanto são facilmente obstruídos por apresentarem orifícios de saída com diâmetros muito pequenos;

- Gotejadores com câmara de vórtice: são emissores do tipo orifício que foram modificados. Os emissores são formados por uma câmara circular com entrada tangencial, na qual a água entra no emissor com uma velocidade angular, que permite o movimento circular e formação de um vórtice, proporcionando perda de carga adicional. Estes emissores comportam orifícios de maior diâmetro, e por isto são menos suscetíveis à obstrução;
- Gotejadores de longo percurso: nestes gotejadores a perda de carga ocorre devido ao atrito durante o escoamento da água em um percurso estreito e longo. A dissipação da energia hidráulica depende das características construtivas dos emissores, tais como geometria, comprimento do percurso e seção. Fazem parte dessa categoria os emissores que apresentam mecanismos de dissipação do tipo labirinto, helicóide e microtubo.

Em relação ao tipo de conexão na linha lateral, os emissores podem ser agrupados em três categorias (ABNT NBR ISO 9261, 2006): (a) *in-line*, quando o emissor é desenvolvido para instalação entre dois trechos de tubo em uma linha lateral de irrigação; (b) *on-line*, quando o emissor é desenvolvido para instalação sobre a parede de uma linha lateral; e (c) emissores formados ou integrados no tubo, quando são inseridos no interior do tubo durante o processo de fabricação, podendo ser subdividido emissor tipo plano (pastilha) ou cilíndrico (bóbi). Os diferentes tipos de emissores são apresentados na Figura 1.

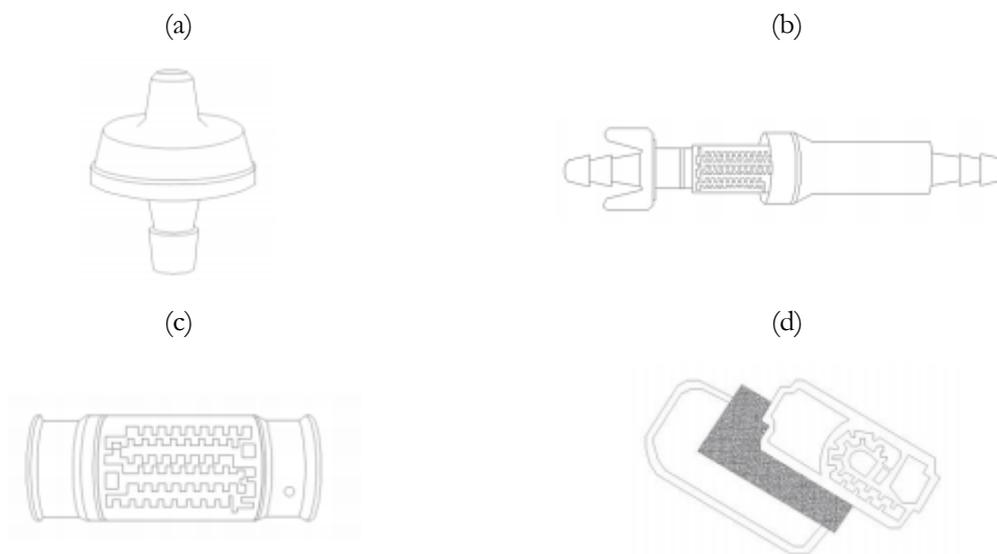


Figura 1. Tipos de gotejadores utilizados na irrigação localizada: gotejador *on-line* (a), gotejador *in-line* (b), gotejador integrado tipo cilíndrico (c), gotejador integrado tipo plano (d) (ARAUJO, 2019)

Emissores utilizados na irrigação por gotejamento podem ainda ser classificados quanto a capacidade de compensação de pressão, havendo emissores regulados ou autocompensantes, e emissores não regulados ou convencionais. Os emissores regulados são capazes de operar com vazão praticamente constante numa faixa de valores de pressão, sendo que esta funcionalidade é proporcionada por uma

membrana móvel e flexível que se deforma sob ação da pressão, variando a secção de escoamento da água e controlando a vazão. Nos emissores não regulados a dissipação da pressão ocorre exclusivamente pela perda de carga ao longo do canal do emissor, não apresentando mecanismos para compensação da variação da pressão, e por isto a vazão de saída varia com a pressão disponível na entrada do emissor (FRIZZONE et al., 2012).

O desempenho hidráulico de um emissor normalmente é avaliado por meio da relação entre a vazão emitida e a pressão de operação. Essa relação costuma ser representada por uma função potencial (equação 1) também conhecida como equação característica do emissor (KELLER; KARMELI, 1974). Essa equação inclui em seus parâmetros k e x , as características geométricas dos emissores e as condições de fluxo durante o escoamento do fluido, e expressa a tendência da curva vazão-pressão.

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

em que, q é a vazão do emissor ($L \cdot h^{-1}$); k é o coeficiente de proporcionalidade; x é o expoente de fluxo; e H é a carga de pressão de operação do emissor (m).

O expoente de fluxo é um indicador da sensibilidade da vazão do emissor a variações na pressão de operação. Valores de x menores refletem melhor desempenho hidráulico pois correspondem a baixa sensibilidade na variação da vazão em função de variações de pressão na linha lateral. Os valores do expoente de fluxo variam tipicamente entre 0,1 a 1,0 dependendo do tipo de emissor e de suas características construtivas (LI et al., 2006c). Com base no expoente de fluxo, os emissores podem ser classificados da seguinte forma: emissores com fluxo totalmente turbulento quando $x = 0,5$; parcialmente turbulento quando $0,5 < x < 0,7$; instável para $0,7 < x < 1,0$; e laminar para $x = 1,0$ (KELLER; KARMELI, 1974). Podem ainda ser encontrados emissores com expoente de fluxo com valores próximos a 0,4, para emissores do tipo vórtice, ou com valores tendendo a zero quando os emissores apresentam mecanismos para compensação da variação de pressão (FRIZZONE et al., 2012). A Figura 2 representa a tendência da curva vazão-pressão para diferentes valores de expoente de fluxo.

Devido ao baixo custo e simplicidade geométrica, os emissores caracterizados por utilizar labirintos como mecanismo de dissipação de energia tem sido os mais utilizados em sistemas de irrigação por gotejamento (ZHANG et al., 2010). Os labirintos são compostos por um canal estreito, constituído por uma série de defletores que intensificam a perda de carga ao longo do canal e ao mesmo tempo mantém condições de fluxo turbulento (WEI et al., 2006; ZHANG et al., 2016). São mecanismos eficientes em termos hidráulicos, pois proporcionam elevada perda de carga utilizando canais com pequenos comprimentos, no entanto, por apresentarem seções de escoamento de pequenas dimensões, são facilmente obstruídos durante seu funcionamento pela presença de impurezas na água (NIU; LIU; CHEN, 2013).

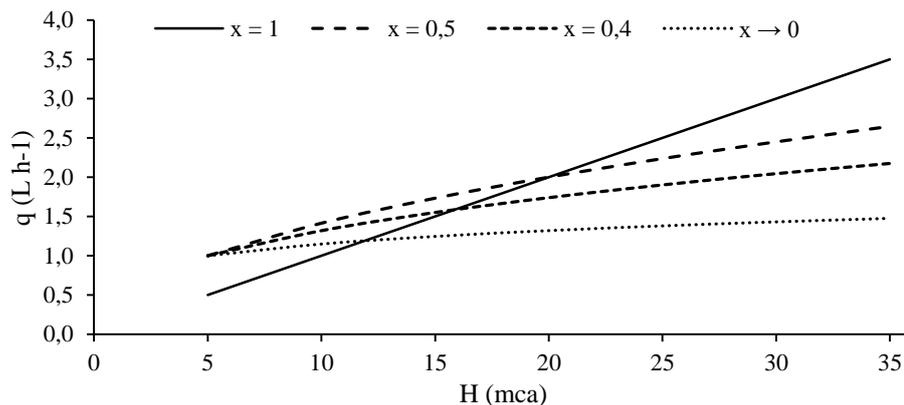


Figura 2. Exemplo de relações vazão-pressão para emissores de fluxo laminar ($x = 1,0$), turbulento ($x = 0,5$), emissor tipo vórtice ($x = 0,4$), e autocompensantes ($x \rightarrow 0$)

2.3. Obstrução dos gotejadores

A obstrução de gotejadores é apontada como um dos principais problemas do sistema de irrigação por gotejamento (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979). Sua ocorrência pode refletir negativamente no desempenho do sistema de irrigação pois reduz a vazão e a uniformidade de distribuição de água (BRALTS; WU; GITLIN, 1981; CAPRA; SCICOLONE, 1998; CARARO et al., 2006; NAKAYAMA; BUCKS, 1991), eleva os custos de manutenção, pode prejudicar a produtividade e a qualidade dos cultivos (LAMM; AYARS; NAKAYAMA, 2006), e altera as características hidráulicas do sistema (DE CAMARGO et al., 2014).

O problema de obstrução na irrigação localizada é resultado da utilização de água de irrigação com baixa qualidade (NAKAYAMA; BUCKS, 1991) associada a falta de manutenção ou dimensionamento inadequados de componentes do sistema. Do ponto de vista operacional, as principais causas que levam os emissores à obstrução são: sistema de filtragem ineficiente, tratamento inadequado da água, e baixa frequência de limpeza das tubulações laterais (LAMM; CAMP, 2007).

Obstrução é um processo que tem como origem a ação individual ou combinada de agentes de natureza química, biológica ou física (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979; PIZARRO, 1996). A obstrução por ação de agentes de natureza biológica resulta da atividade de microrganismos como algas, fungos e bactérias no interior do sistema de irrigação. Estes microrganismos não são retidos pelo sistema de filtragem, e utilizam os nutrientes presentes na água para se desenvolverem e formarem colônias no interior dos tubos ou dos gotejadores. Algumas bactérias, devido à oxidação do ferro dissolvido e do sulfeto de hidrogênio, originam biofilmes, agindo como adesivos permitindo acúmulo de argila, algas e outras partículas relativamente pequenas, proporcionando a obstrução gradual dos emissores (ADIN; SACKS, 1991). O problema de obstrução biológica é mais expressivo quando a prática de irrigação é desenvolvida utilizando efluentes (GAMRI et al., 2014; LI et al., 2012a). Na maioria das situações, a cloração da água é o

principal método adotado para o controle da população de microrganismos e para evitar este tipo de problema (NAKAYAMA; BUCKS, 1991).

A obstrução de natureza química é resultado da precipitação de íons, que podem formar incrustações que bloqueiam a passagem de água no interior do emissor. A precipitação de íons é condicionada por diversos fatores, podendo se destacar o pH da água, apontado como o fator de maior relevância (LAMM; CAMP, 2007). Mantendo-se o pH da água de irrigação inferior a sete, grande parte dos problemas ligados à precipitação de íons são evitados, assim como a proliferação de microrganismos é desfavorecida (PINTO et al., 2011).

Problemas de obstrução de natureza física são ocasionados pela presença de partículas em suspensão na água de irrigação, que podem ser de origem inorgânica ou orgânica (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979). Durante a operação, esses materiais conseguem passar pelo pré-filtro dos gotejadores e bloqueiam os canais de escoamento da água.

A determinação exata da causa da obstrução é difícil devido os vários agentes presentes na água de irrigação e suas interações, uma vez que as três formas de obstrução podem ser observadas de forma simultânea em campo (GILBERT et al., 1981). Isso tem dificultado a realização de pesquisas que objetivam solucionar o problema de obstrução dos emissores. Na literatura especializada ainda não existe um consenso em relação ao método de avaliação do risco de obstrução, o que provavelmente se deve ao difícil entendimento do papel de cada fator no processo de obstrução (PIZARRO, 1996). Todavia, com o objetivo de realizar uma orientação quantitativa, Bucks e Nakayama (1991) propuseram uma classificação da qualidade da água que serve como indicativo do risco de obstrução dos emissores (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação da qualidade da água, relativa ao potencial de obstrução de gotejadores

Fatores de obstrução	Classificação de risco		
	Pequena	Moderada	Severa
Físico			
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	<50	50-100	>100
Químicos			
pH	<7	7-8	>8
Sólidos dissolvidos (mg L ⁻¹)	<500	500-2000	>2000
Manganês (mg L ⁻¹)	<0,1	0,1-0,5	>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	>2,0
Biológico			
Número de bactérias (n ^o mL ⁻¹)	<10000	10000-50000	>50000

Fonte: Bucks e Nakayama (1991)

2.4. Obstrução de natureza física

A obstrução de natureza física é ocasionada por partículas sólidas presentes em suspensão na água de irrigação e tem sido apontada como a mais comum entre os tipos de obstrução (LI et al., 2012b). As partículas podem ser de origem inorgânica (areia, silte, argila e plásticos) e orgânica (organismos aquáticos, zooplâncton, caramujos, peixes, larvas de insetos, formigas e aranhas) (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT,

1979). Geralmente, as partículas encontradas na água de irrigação fazem parte da constituição do solo e podem ser separadas de acordo com o diâmetro médio das partículas como: areia (2 a 0,05 mm), silte (0,05 a 0,002 mm) e argila (menor que 0,002 mm) (BOUNOUA et al., 2016a; HILLEL, 2003).

A obstrução de natureza física que ocorre nos microcanais utilizados em gotejadores pode ocorrer de três formas: 1) obstrução por peneiramento, ocorre quando o diâmetro da partícula é maior que a seção de passagem do emissor (esse mecanismo é comum para partículas de areia); 2) obstrução por agregação e acúmulo lento de partículas, devido a deposição gradual de partículas finas no interior do canal (BOUNOUA et al., 2016; BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979; NIU; LIU; CHEN, 2013); e, 3) obstrução em ponte ou arco, quando as partículas apresentam diâmetro menor que a largura do canal, no entanto a combinação do fluxo com alta concentração de partículas pode gerar estruturas semelhantes a pontes, compostas por duas ou mais partículas, obstruindo o canal de escoamento (DRESSAIRE; SAURET, 2017).

O risco de obstrução de natureza física está associado à qualidade da água utilizada durante a irrigação. Atualmente a literatura dispõe de duas principais classificações para indicar o risco de obstrução devido a utilização de determinada água. A primeira foi proposta por Bucks, Nakayama e Gilbert, (1979) sendo classificado da seguinte forma: a) sem risco de obstrução, quando as concentrações de partículas são inferiores a 50 mg L⁻¹; b) moderado risco de obstrução, em concentrações entre 50 e 100 mg L⁻¹; e, c) alto risco de obstrução, em concentrações acima de 100 mg L⁻¹. A segunda foi proposta por Capra e Scicolone (1998) e foi desenvolvida por meio de avaliações em campo. Os autores sugeriram que concentrações de sólidos suspensos menores que 200 mg L⁻¹ não apresentam risco de obstrução; concentrações entre 200 e 400 mg L⁻¹ apresentam moderado risco de obstrução; e, concentrações superiores a 400 mg L⁻¹ apresentam severo risco de obstrução. Portanto, evidencia-se uma diferença demasiadamente grande entre os valores indicativos de risco de obstrução.

Existem diversos parâmetros ligados à qualidade da água que podem determinar o risco de obstrução dos emissores. Contudo, as classificações apresentadas avaliam o risco de obstrução relativo apenas a concentração de partículas presentes em suspensão, o que pode ser considerado uma limitação. Pesquisas demonstram que na obstrução de natureza física, além da concentração de partículas, a granulometria do material presente na água pode também influenciar o nível de sensibilidade dos emissores à obstrução (LAVANHOLI et al., 2018; LI et al., 2006a; NIU; LIU; CHEN, 2013; PERBONI et al., 2018), e por isso deveria ser incluído na classificação de risco.

Algumas pesquisas tem avaliado a suscetibilidade de emissores à obstrução submetendo-os a operação com água contendo partículas sólidas com granulometria entre 0,045 a 0,5 mm distribuídas em concentrações variando de 250 a 2000 mg L⁻¹ (LI et al., 2006a; QINGSONG et al., 2008; WEI et al., 2008), faixa de concentração dentro e superior aos valores declarados nas classificações apresentadas. Enquanto emissores foram obstruídos por partículas com pequenos diâmetros sob baixas concentrações, outros mostraram-se resistentes à obstrução mesmo em situações de elevada concentração e partículas de maior granulometria.

Existem também trabalhos que foram realizados dentro ou próximo do limite de classificação de risco. Faria (2013) utilizou concentrações de partículas de 125 e 500 mg L⁻¹. A fonte de partículas foi areia

média e fina dividida em diferentes faixas granulométricas, com diâmetro variando entre 0,053 a 0,500 mm. Trabalho semelhante foi desenvolvido por Perboni et al. (2018) que utilizou areia de filtro com diâmetro de partículas entre 0,053 a 0,500 mm e três concentrações de partículas (100, 250 e 500 mg L⁻¹). Lavanholi et al. (2018) avaliaram o desempenho de quatro modelos de emissores de geometrias e dimensões distintas submetidos a risco de obstrução utilizando partículas sólidas com granulometria inferior a 0,5 mm em concentrações entre 125 e 500 mg L⁻¹. Nestes trabalhos foi identificado que sob as diferentes faixas granulométricas estudadas os emissores apresentaram diferentes desempenhos relacionado à obstrução, e que em alguns casos houve efeito da interação entre a concentração de partículas e granulometria. Estes resultados evidenciam a necessidade de considerar-se ambos os fatores ao avaliar a sensibilidade de gotejadores à obstrução ocasionada por partículas sólidas.

Niu, Liu e Chen (2013a) avaliaram o desempenho de gotejadores operando com água contendo partículas com diâmetro inferior a 0,1 mm em concentrações de até 2000 mg L⁻¹. Os autores identificaram que concentrações inferiores a 250 mg L⁻¹ não apresentaram reduções de vazão significativas; concentrações entre 500 a 1200 mg L⁻¹ resultaram moderada redução de vazão; e, concentrações maiores que 1200 mg L⁻¹ causaram severa obstrução. Com relação ao diâmetro, observou-se que partículas com granulometria entre 0,031 a 0,038 mm apresentam maior potencial de obstrução dos emissores. Os autores atribuíram este fenômeno à dois fatores: 1) deposição de partículas nos canais do labirinto proporcionada pelo aumento de colisões entre as partículas e a elevada força de arraste; 2) composição da partícula, em que a areia fina e silte proporcionam interações complexas, que resultam na formação de agregados, bloqueando o fluxo nos labirintos dos gotejadores.

Embora os parâmetros envolvidos no processo de obstrução dos emissores sejam conhecidos, há uma grande dificuldade em estabelecer uma relação entre a qualidade da água e a sensibilidade dos emissores à obstrução. Além dos parâmetros qualitativos e quantitativos pertinentes à água utilizada na irrigação, a suscetibilidade dos emissores à obstrução é profundamente relacionada com as características construtivas dos labirintos dos gotejadores, apontado com um dos fatores de maior relevância (ADIN; SACKS, 1991; TAYLOR et al., 1995). As características geométricas dos labirintos são variadas e por isto conduzem a diferentes sensibilidades à obstrução, mesmo quando submetidos em condições de operação similares. Li et al. (2006a) estudando 16 modelos de emissores observaram que a obstrução dos labirintos de diferentes geometrias foi ocasionada por partículas de diferentes diâmetros sob diferentes concentrações. Enquanto emissores de determinadas geometrias foram obstruídos por partículas com diâmetro de 0,07 mm, o desempenho de outros emissores não foi afetado pela presença de partículas na água em nenhuma das fases de ensaio.

O método tradicional para controle da obstrução associada a partículas sólidas tem sido a utilização de sistemas de filtragem. Esta técnica consiste na utilização de equipamentos que podem utilizar diferentes princípios de funcionamento para retirada das partículas sólidas em suspensão, sendo os mais comuns os centrífugos e filtros com elemento ou meio filtrantes como o de tela, disco ou areia.

Quando bem dimensionados e manejados, os sistemas de filtragem apresentam boa capacidade em reter as partículas sólidas em suspensão. Wu et al. (2015) identificaram eficiência de remoção de

partículas na ordem de 80,3% utilizando uma combinação de filtros de areia e disco. No entanto, esta técnica tem como principal limitação baixa eficiência em reter partículas muito finas, permitindo que passem pelos filtros e alcancem os emissores. Em estudos realizados por Adin e Elimelech (1989), a taxa de remoção de sólidos suspensos maiores que 0,01 mm pelos filtros de areia foi relativamente elevada, enquanto que para partículas no tamanho entre 0,001 e 0,002 mm a eficiência de remoção tendeu a zero.

A limpeza periódica das linhas laterais (*flushing*) é uma rotina de manutenção que contribui para a prevenção da obstrução de emissores e elimina partículas que escapam do sistema de filtragem e se acumulam gradativamente nas extremidades de tubulações. Tal procedimento consiste na abertura do fim da linha lateral possibilitando a remoção de partículas por meio do fluxo de água com elevada velocidade, reduzindo o risco de obstrução dos emissores e prolongando a vida útil do equipamento (PUIG-BARGUÉS et al., 2010; YU et al., 2018a).

Em geral, as partículas finas que passam pelo sistema de filtragem são bem menores que as dimensões do labirinto e, isoladamente, não apresentariam potencial para obstrução dos emissores. Contudo, influenciadas pelas características do escoamento no labirinto e pelas condições físico-químicas da solução, é possível que ocorra a aglomeração de partículas após o sistema de filtragem podendo sedimentar em regiões específicas no canal do labirinto e conseqüentemente resultar na obstrução de emissores (BOUNOUA, 2010; BOUNOUA et al., 2016; LAVANHOLI, 2016; NIU; LIU; CHEN, 2013; OLIVEIRA, 2017; THILL et al., 2001).

2.5. Regime de escoamento nos labirintos de emissores

O escoamento dos fluidos em condutos pressurizados pode ser classificado em regime laminar, turbulento ou zona crítica. As características de escoamento em cada regime dependem da rugosidade da parede e geometria do conduto, da velocidade de escoamento, e das propriedades físicas do fluido. Reynolds (1895) identificou que o regime de fluxo depende da relação entre forças inerciais e forças viscosas que atuam no fluido durante o escoamento. Esta relação é conhecida como número Reynolds (R_e), e resulta em um número adimensional. Para fluxo em condutos o número de Reynolds é definido por:

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

em que, R_e é o número de Reynolds (adimensional); V é a velocidade média de escoamento (m s^{-1}); D é o diâmetro da seção de escoamento (m); e ν é o coeficiente de viscosidade cinemática do fluido ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Em condutos pressurizados o regime de escoamento é classificado como laminar para $R_e \leq 2000$, zona crítica para $2000 < R_e < 4000$ e turbulento para $R_e \geq 4000$.

Segundo Yu et al. (2018a), o número de Reynolds nos labirintos dos emissores utilizados na irrigação por gotejamento está entre 78 e 1284. Considerando os critérios tradicionais, o fluxo através dos

canais de labirinto é classificado tipicamente como laminar, que se dá pelas baixas vazões e as pequenas dimensões dos canais de escoamento. Porém, os labirintos são compostos por vários defletores, o que torna a geometria do canal complexa, e por isto o valor crítico para o número de Reynolds é diferente dos tubos.

Estudando as características do fluxo em canais de pequenas dimensões com parede ondulada simétrica, Nishimura et al. (1990) identificaram que a transição do regime laminar para o turbulento ocorreu para R_e entre 200 e 300. Avaliando o regime de escoamento em canais de labirintos triangular utilizados em gotejadores, Zhang et al. (2016) identificaram que o número de Reynolds no qual o fluxo muda de laminar para turbulento ocorreu entre 43 e 94, valores muito abaixo do número de Reynolds crítico para condutos pressurizados.

As razões pela qual a transição do regime de fluxo laminar para o fluxo turbulento em labirintos de gotejadores ocorre em baixos números Reynolds é dada por duas hipóteses: a primeira considera que a pequena área da seção transversal da passagem de fluido permite que o fluxo seja facilmente afetado pela rugosidade do canal; a segunda é justificada pelas mudanças nas direções de escoamento e pelos complicados limites do caminho de escoamento, que não são retilíneos e por isso favorecem fluxo turbulento (WEI et al., 2006; YU et al., 2018b).

2.6. Efeito das características construtivas dos canais nas propriedades de fluxo e desempenho hidráulico dos emissores

O escoamento do fluido nos labirintos de gotejadores segue padrões complexos e se diferenciam do escoamento em condutos pressurizados devido as mudanças repentinas na direção do fluxo. Os labirintos são canais tortuosos constituídos por uma série de defletores que normalmente induzem a formação de três regiões de fluxos com características distintas. A primeira é denominada de fluxo principal, apresenta elevada velocidade de escoamento e ocorre na região central do labirinto, que devido mudanças contínuas na direção do fluxo pelos defletores, move-se ao longo do caminho em forma de “S”. A segunda são regiões de recirculações, denominadas de vórtices, formadas por fluxos individuais distribuídos em ambos os lados da área do fluxo principal, ocorrendo preferencialmente em zonas mortas do canal, sendo caracterizadas por apresentarem uma região central de baixa velocidade de escoamento e periférica com velocidades de escoamento relativamente elevadas. (AL-MUHAMMAD et al., 2018; WEI et al., 2006; YU et al., 2018c). A terceira região, denominada de áreas de estagnação, é caracterizada por apresentar baixa velocidade de escoamento, contudo, não há formação de vórtices (ZHANG et al., 2010). Na Figura 3 é ilustrado as três regiões de escoamento no interior de um labirinto trapezoidal, em que A corresponde às regiões de estagnação, B corresponde às regiões de vórtices e C corresponde a região do fluxo principal.

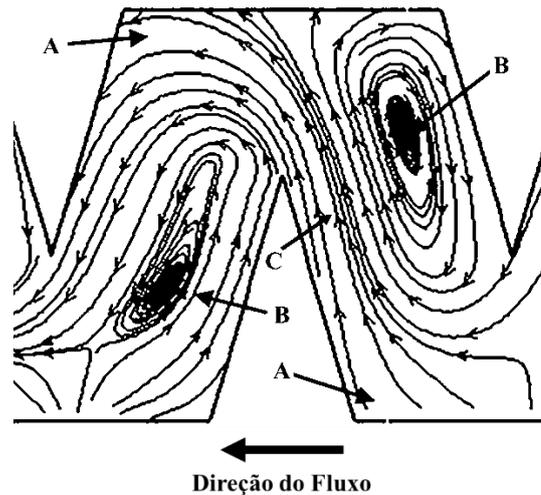


Figura 3. Distribuição das linhas de fluxo que no interior dos labirintos de gotejadores destacando-se as três regiões de escoamento (A, região de estagnação; B, região de vórtice; C, região do fluxo principal) (ZHANG et al., 2010)

O efeito combinado do fluxo principal e os vórtices atribuídos aos labirintos a características de proporcionarem elevada perda de carga durante o escoamento do fluido. Em labirinto de gotejadores a maior parte da perda de carga ocorre nas regiões localizadas próximo aos picos dos defletores, local que coincide com o ponto de maior velocidade de escoamento na região do fluxo principal. As regiões de recirculação também apresentam grandes benefícios do ponto de vista hidráulico pois aumentam a dissipação de energia cinética, afetando diretamente a eficiência da dissipação de energia hidráulica e a velocidade do fluxo ao longo da direção do comprimento do labirinto (WEI et al., 2006).

Os padrões de escoamento são sensivelmente afetados pelas características construtivas e dimensões do canal do labirinto, o que interfere também na dissipação da energia hidráulica e no expoente de fluxo. Segundo Wei et al. (2006), a dissipação de energia por unidade defletora em labirintos com geometria triangular é maior que nos de geometria trapezoidal e retangular. Com relação ao expoente de fluxo dos emissores, para canais retangulares, trapezoidais e triangulares foram observados valores de 0,611, 0,483 e 0,460, respectivamente. Os parâmetros construtivos e as dimensões de cada labirinto é apresentado na Figura 4 e na Tabela 2.

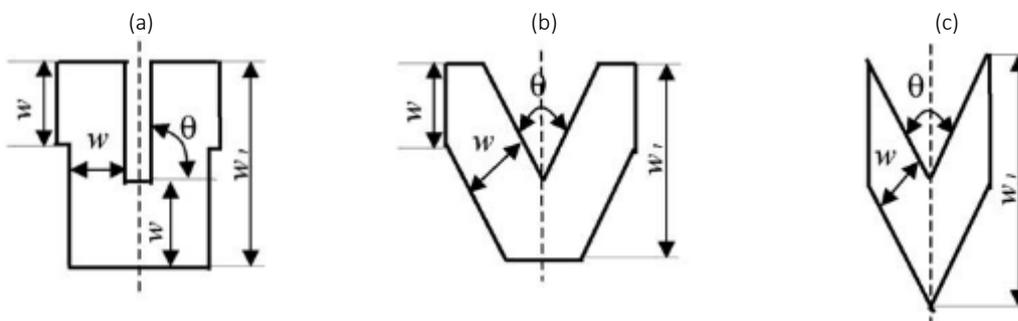


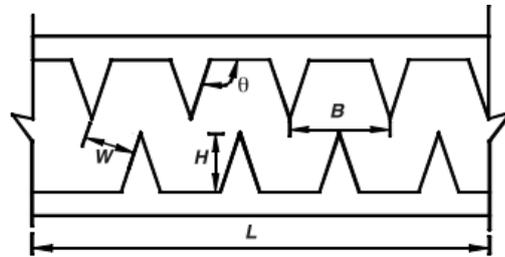
Figura 4. Parâmetros estruturais dos labirintos, sendo w a largura do canal, w_t a largura total do labirinto, e θ o ângulo do defletor dos labirintos retangular (a), trapezoidal (b) e triangular (c) estudados por Wei et al. (2006)

Tabela 2. Parâmetros estruturais dos labirintos estudados por Wei et al. (2006)

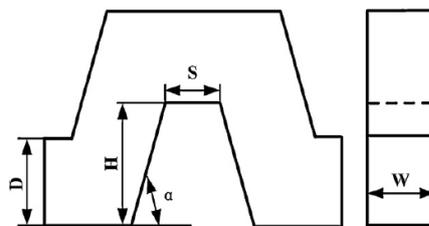
Emissor	Parâmetros estruturais				
	w (mm)	θ (°)	w1 (mm)	d (mm)*	n**
Retangular	1,0	90	4,0	0,5	24
Trapezoidal	0,7	60	2,7	0,7	25
Triangular	0,7	60	4,0	0,7	8

(*) d é a profundidade do canal; (**) n é o número de unidades defletoras.

Li et al. (2006a) estudaram o efeito do espaçamento entre defletores (B), ângulo do defletor (θ), altura do defletor (H), e a profundidade do canal (D) no desempenho hidráulico de labirintos com formato trapezoidal (Figura 5) com comprimento (L) de 19,2 mm. Os resultados mostraram que o espaçamento entre defletores foi o único parâmetro que influenciou significativamente o expoente de fluxo do labirinto. Com relação a vazão do emissor, apenas a profundidade do canal, o espaçamento e o ângulo do defletor tiveram efeito significativo.

**Figura 5.** Características geométricas do labirinto de formato triangular avaliado por Li et al. (2006)

Zhang, Zhao e Lu (2013) avaliaram o efeito de diversos parâmetros na perda de carga em labirintos com formato trapezoidal (Figura 6). Os parâmetros estudados foram ângulo do defletor (α), relação altura do defletor e largura do canal (H/D), relação largura e profundidade do canal (D/W), e relação largura da crista e altura do defletor (S/H). Os resultados obtidos mostraram que a sequência de significância dos parâmetros no potencial de perda de carga do labirinto foi $\alpha > S/H > H/D > D/W$. O aumento de α resultou na elevação da perda de carga nos defletores. Por outro lado, elevações nas relações S/H e H/D resultaram em reduções na dissipação da energia hidráulica. Já o aumento da relação D/W , inicialmente fez com que a eficiência de dissipação se eleve e posteriormente decaia.

**Figura 6.** Parâmetros dimensionais e características geométricas dos labirintos (ZHANG; ZHAO; LU, 2013)

Yu et al. (2018c) avaliaram as características de escoamento em labirintos trapezoidal com ângulos de defletores de 90° , 60° , 45° e 30° (Figura 7) e observaram que para os ângulos menores a velocidade

máxima na região do fluxo principal e nos vórtices diminuíram de forma significativa. Ao reduzir o ângulo dos defletores de 90° para 30° foram identificadas reduções no valor do expoente de fluxo (α) de 0,49 para 0,47 e reduções no valor do coeficiente de proporcionalidade (k) de 1,21 para 0,97. Segundo os autores, defletores com ângulos menores elevam a intensidade de turbulência durante a movimentação do fluido, conduzindo a maiores perda de carga e fazendo com que a sensibilidade das variações na vazão diminua quando a pressão é alterada, o que reduz o expoente de fluxo do emissor.

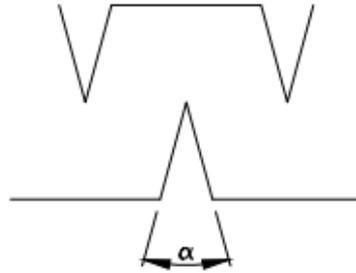


Figura 7. Representação do ângulo do defletor adotado por Yu et al., (2018c)

Labirintos com geometria trapezoidal também foram analisados em detalhe por Dazhuang et al. (2007), que variou os parâmetros construtivos dos defletores (Tabela 3 e Figura 8). Para defletores inclinados em 32° os expoentes de fluxo foram de 0,472, 0,462, 0,471 e 0,505 para as geometrias *I*, *II*, *III*, e *IV*. O desempenho hidráulico satisfatório foi atendido pela geometria *II*, onde o expoente α é o menor. Os autores observaram que a geometria do tipo *I* tem uma grande região de baixa velocidade na região do vórtice, que não é benéfica para a dissipação de energia. Ao aumentar a altura do defletor, a região de baixa velocidade é significativamente reduzida e os vórtices totalmente desenvolvidos. Mas, ao aumentar a altura do defletor para 1,6 e 2,0 mm, a região de recirculação na parte de trás dos defletores torna-se prolongada e a velocidade de fluxo nesta região foi reduzida. Eles concluíram que o caminho de fluxo do tipo *II* tem um bom desempenho e uma dissipação efetiva de energia.

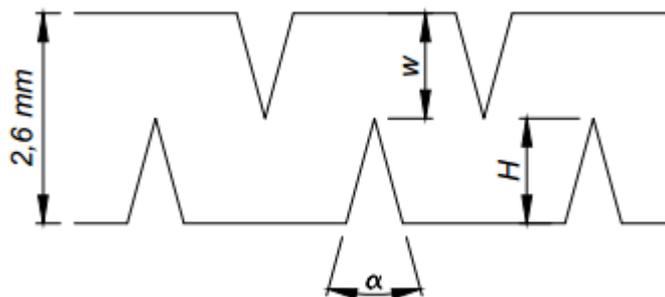


Figura 8. Parâmetros geométricos dos labirintos estudados por Dazhuang et al. (2007)

Tabela 3. Parâmetros estruturais dos labirintos estudados por Dazhuang et al. (2007)

Parâmetro	Geometria			
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
<i>H</i> (mm)	1,0	1,3	1,6	2,0
<i>W</i> (mm)	1,6	1,3	1,0	0,6
<i>H/W</i>	0,6	1,0	1,6	3,3

Além das dimensões dos canais, alterações no formato dos labirintos apresentam efeitos significativos nas características de escoamento e no desempenho hidráulico dos emissores. Feng et al. (2017) observaram que ao alterar as características construtivas dos labirintos e eliminar as regiões que permitem a formação de vórtices, houve sérias reduções no desempenho hidráulico. A eliminação dos vórtices provocou dissipação de energia insuficientes, fazendo com que a vazão dos labirintos aumentasse entre duas a cinco vezes comparado à vazão do projeto inicial. Os autores relatam ainda que para manter a vazão próxima do emissor com características construtivas originais, seria necessário aumentar o número de unidades defletoras dos labirintos modificados, aumentando o comprimento do labirinto, o que resultaria em aumento no custo de fabricação.

2.7. Relação entre as características construtivas dos labirintos e obstrução dos emissores

A sensibilidade de um emissor à obstrução está diretamente relacionada com as dimensões e geometria na qual os labirintos foram desenvolvidos. Avaliando o desempenho de gotejadores em campo, utilizando água de reuso, Adin e Sacks (1991) identificaram que a sedimentação de partículas e a elevada suscetibilidade dos emissores à obstrução estava intimamente relacionado à estrutura do canal. Por isso, sugeriram que o design do canal deveria ser otimizado por meio de alterações em sua estrutura. Taylor et al. (1995) investigou experimentalmente vários fatores que causam a obstrução de emissores e apontaram que o design do labirinto foi o fator mais importante na sensibilidade do gotejador à obstrução.

Diversas pesquisas têm buscado relacionar as características construtivas dos labirintos de gotejadores com sua sensibilidade à obstrução. Zhang et al. (2010a) avaliaram a taxa de passagem de partículas em labirintos trapezoidais variado em quatro níveis as relações dos parâmetros construtivos do canal S/H , H/D , D/W e a (Figura 6). Os resultados obtidos indicaram que o ângulo do defletor (a) foi o fator que mais afeta a taxa de passagem de partículas pelo labirinto. Em seguida os fatores de maior relevância foram D/W , S/H , e H/D . Os autores também encontraram que a combinação ótima para os fatores avaliados seria um emissor construído com as seguintes características: $D/W=0,9$, $H/D=1$, $S/H=2/3$ e $a=\pi/3$.

Li et al. (2006a) também estudaram a influência dos parâmetros geométricos dos labirintos de gotejadores no desempenho antiobstrução. Os parâmetros estudados (Figura 5) foram ângulo do defletor (θ), espaçamento entre defletores (B), altura do defletor (H) e profundidade do canal de escoamento (D) em quatro níveis cada. Os testes foram conduzidos em laboratório utilizando água contendo partículas sólidas

com granulometria entre 0,045 a 0,5 mm distribuídas em concentrações variando de 250 a 2000 mg L⁻¹. Pelos resultados obtidos, observou-se que ângulo, espaçamento, e altura do defletor tiveram efeito significativo na resistência à obstrução dos labirintos. Por outro lado, a profundidade do canal não afetou o desempenho dos emissores para a faixa de profundidades estudada. Os autores observaram que os melhores resultados foram obtidos para os emissores construídos com $\theta = 108^\circ$, $B = 2,5$ mm, $H = 1,3$ mm e $D = 0,6$ mm.

Realizando um estudo experimental com os emissores com ângulos de defletores de 90° , 60° , 45° e 30° (Figura 7), Yu et al. (2018c) observaram que labirintos equipados com ângulos menores tendem a apresentar maior sensibilidade à obstrução. Nos experimentos conduzidos os emissores foram submetidos a condições de operação com água contendo partículas com diâmetro máximo de 125 μm e concentração de 10 g L⁻¹. Os emissores com ângulos de 90° , 60° , 45° e 30° alcançaram o valor de 75% de redução de vazão após o 11^o, 10^o, 7^o e 6^o dia de ensaio, respectivamente.

Em geral, a elevada suscetibilidade dos gotejadores à obstrução é explicada pelas pequenas dimensões do canal e pelas características de escoamento que ocorrem no labirinto, que conseqüentemente depende da geometria do canal. Locais com baixa velocidade de escoamento, como as regiões de estagnação de fluxo e as de vórtices, proporcionam baixa capacidade de sustentação das partículas, o que favorece a sedimentação e acúmulo de sedimentos no canal, provocando a obstrução do emissor (ZHANG et al., 2010).

Em labirintos de gotejadores, o problema de obstrução causado pela sedimentação de partículas ocorre com mais frequência na entrada do canal e nos primeiros defletores do labirinto (NIU; LIU; CHEN, 2013). Devido ao escoamento uniforme na seção do canal e a ausência de vórtices bem desenvolvidos, a velocidade de escoamento e a energia cinética turbulenta são caracterizadas por valores baixos, e por isso favorecem a sedimentação e acúmulo das partículas (AIT-MOUHEB et al., 2019; AL-MUHAMMAD; TOMAS; ANSELMET, 2016; AL-MUHAMMAD et al., 2018). Mesmas partículas muito finas, como as argilas, são capazes de se depositarem nestas regiões pois são submetidas a elevada força de arraste, fazendo com que as partículas não consigam escapar dos vórtices. Este efeito associado às condições físico/químicas favorecem a agregação e facilita o acúmulo de partículas no labirinto levando o emissor à obstrução (AIT-MOUHEB et al., 2019; BOUNOUA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017).

À medida que o fluxo evolui através dos defletores, os vórtices tornam-se bem desenvolvidos, que em geral é hidraulicamente estável após o terceiro defletor dos labirintos. Este efeito promove o aumento da velocidade de escoamento nos vórtices e no fluxo principal, e eleva a energia cinética turbulenta, reduzindo o risco de sedimentação e acúmulo de partículas no labirinto (AIT-MOUHEB et al., 2019).

Problemas de obstrução física decorrentes da sedimentação de partículas em gotejadores podem ser tratados por duas formas de otimizações dos labirintos. A primeira consiste em projetar os labirintos eliminando as regiões de estagnação de fluxo e vórtices, enfatizando a área de fluxo principal a fim de melhorar o transporte de partículas através do canal. A segunda consiste em manter as regiões de recirculação, porém otimizar as câmaras de vórtices por meio de arredondamento dos cantos, de modo que a região de recirculação seja completamente desenvolvida e com elevada velocidade em sua região periférica,

promovendo a capacidade de autolimpeza do emissor, por meio da lavagem da parede do canal e impedindo o acúmulo de partículas. Dentre as duas formas, a otimização das regiões de vórtices é a opção mais viável do ponto de vista prático e industrial, pois garante que não haverá sedimentação de partículas no canal e ainda garante o bom desempenho hidráulico do emissor (FENG et al., 2017).

Gotejadores que não apresentam mecanismos compensadores de pressão também podem ter sua suscetibilidade à obstrução afetada pelas características operacionais. Liu et al. (2019) identificaram que o desempenho antiobstrução de gotejadores convencionais diminuiu com a redução da pressão de operação. Ao diminuir a pressão de operação, a velocidade média de escoamento no labirinto também reduz, fazendo com que o fluxo seja insuficiente para transportar as partículas para fora do labirinto. Além disso, à medida que a pressão de operação diminui, a vazão média dos emissores diminui, o que reduz a força de cisalhamento hidráulica. Este efeito contribui com a formação de agregados maiores, acelerando o processo de obstrução do emissor.

2.8. Características de movimentação de partículas sólidas em labirintos

O transporte e a deposição de partículas no canal de escoamento são os principais fenômenos que interferem na obstrução do emissor (ADIN; SACKS, 1991) e estão intimamente relacionados com as características de movimentação dos sólidos em suspensão. Existem duas forças que interferem na trajetória das partículas ao longo de um labirinto. A primeira é a força de arraste que é sempre diretamente proporcional à área projetada da partícula na direção do fluxo, predominante quando a partícula apresenta pequenos diâmetros. A segunda é a força de inércia, diretamente proporcional ao volume da partícula, que é muito maior em partículas grandes (JUN et al., 2007; YU et al., 2018b).

Adotando um modelo numérico, Jun et al. (2007) estudaram a trajetória de partículas sólidas com diâmetros de 5, 50 e 300 μm no interior de um labirinto de formato trapezoidal. Os autores observaram que quando o diâmetro da partícula foi de 5 μm , devido à maior força de arrasto, a trajetória das partículas seguiu as linhas de fluxo do fluido, deslocando-se preferencialmente na região do fluxo principal no centro do labirinto. A partícula raramente colidiu com as regiões localizadas nas bases dos defletores, no entanto foi propensa a ser arrastada para dentro dos vórtices, e como a força de arraste prevaleceu sobre a força inercial, a partícula permaneceu em um movimento circular contínuo, falhando em escapar dos vórtices. Esse efeito eleva a probabilidade de deposição da partícula na região dos vórtices, e com isso sérios problemas de obstrução podem aparecer nessas regiões quando os emissores estão sendo utilizados em condições adversas. Quando o diâmetro da partícula aumentou para 50 μm , a força de arrasto aumentou quase 100 vezes, enquanto a força de inércia aumentou em quase 1000 vezes, fazendo com que ambas as forças fossem aproximadamente da mesma ordem de grandeza. Por isso as trajetórias das partículas alternaram-se entre seguir o fluxo principal e colidir com as paredes superior e inferior do canal. À medida que o diâmetro aumentou (300 μm), a força inercial passou a prevalecer e a partícula foi impulsionada pela aceleração centrífuga a se deslocar em direção às paredes superior e inferior ao passar por cada defletor. Por isso a

perda de energia cinética devido a colisões frequentes com a parede do canal aumenta, enquanto a possibilidade de ficar presa nos vórtices diminui. A Figura 9 mostra as trajetórias das partículas com diferentes diâmetros ao longo do labirinto.

Yu et al. (2018a) estudaram o movimento de partículas de areia, com diâmetro de 65, 100 e 150 μm , no interior de labirintos de gotejadores utilizando também modelo numérico. Os resultados mostraram que partículas com tamanho de 65 μm deslocam-se preferencialmente na região do fluxo principal sem entrar nas áreas dos vórtices. Para diâmetro de 100 μm , as partículas também se moveram preferencialmente no fluxo principal, porém eventualmente podem se desviar e entrarem na região de recirculação, escapando e retornando ao fluxo principal. Para partículas no tamanho de 150 μm , a trajetória da partícula foi mais perturbada deixando várias vezes o fluxo principal e entrando em várias áreas de recirculação.

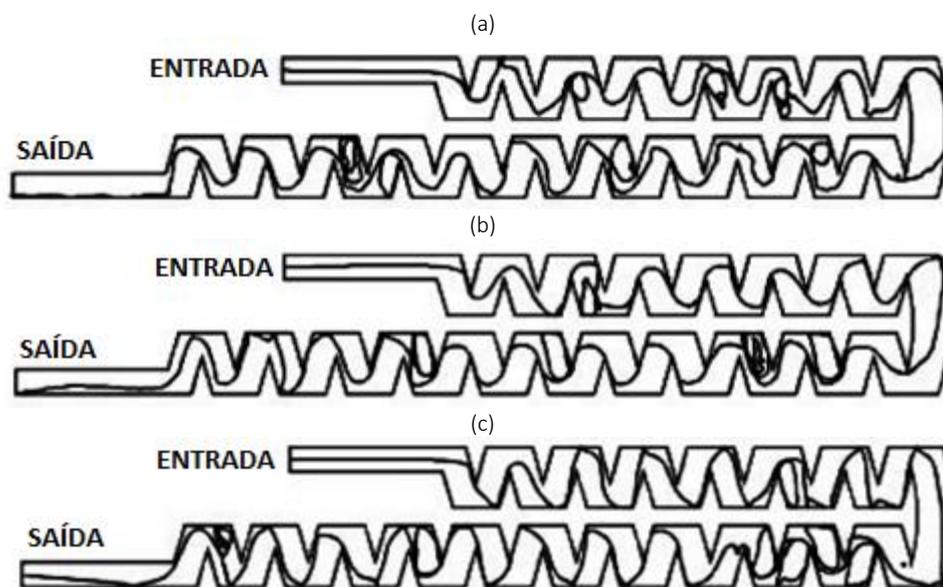


Figura 9. Trajetórias de partículas, obtidas numericamente, no canal do labirinto trapezoidal: (a) partícula com diâmetro de 5 μm ; (b) partícula com um diâmetro de 50 μm ; e (c) partículas com um diâmetro de 300 μm (JUN et al., 2007)

Assim como Jun et al. (2007), Yu et al. (2018a) justificam que as diferentes trajetórias das partículas com os diferentes diâmetros avaliados ocorreram devido as variações nas intensidades das forças que atuam nas partículas durante sua movimentação. Para partículas no tamanho de 65 μm , a força de arrasto foi muito superior ao da força inercial e por isso moveram-se apenas no fluxo principal. Com o aumento do diâmetro para o tamanho de 100 μm , a força de arrasto e a força inercial tenderam ao equilíbrio, o que aumentou a probabilidade de entrada de partículas nos vórtices. Quando o diâmetro foi elevado para 150 μm a força inercial se tornou a principal força e por isso as partículas tenderam a deixar o fluxo principal e entrar nas áreas de vórtices.

Além da trajetória, a velocidade de deslocamento da partícula também é influenciada pelo seu diâmetro. Yu et al. (2018a) observaram que para partículas com tamanho de 65 μm , a velocidade de deslocamento variou entre 0,76 e 2,37 m s^{-1} , com velocidade média de 1,48 m s^{-1} , e variações graduais na velocidade ao longo da trajetória da partícula. Para partículas no tamanho de 100 μm , a velocidade foi

consideravelmente modificada e com variações repentinas. A velocidade variou entre 0,08 a 2,05 m s⁻¹ e a velocidade média foi de 0,77 m s⁻¹. Para partículas no tamanho de 150 µm, a velocidade variou drasticamente ao longo da trajetória e com elevada frequência. A velocidade de deslocamento da partícula variou entre 0,07 a 1,80 m s⁻¹ com velocidade média de 0,55 m s⁻¹.

Em geral, partículas de grande diâmetro apresentam baixa velocidade de deslocamento e são capazes de deixar a região do fluxo principal e entrar nas áreas dos vórtices, recirculando continuamente. Por este motivo, o tempo que as partículas permanecem dentro do canal dos labirintos é maior quando comparado às partículas de menor dimensão. Devido a esta característica, quando há entrada contínua de impurezas no interior do labirinto ocorre armazenamento de partículas no canal, o que resulta no aumento da concentração. Yu et al. (2018a) observou que após atingir o equilíbrio dinâmico entre entrada e saída de partículas no canal dos labirintos, o número de partículas de areia com diâmetro de 65, 100 e 150 µm no canal foi 632, 671 e 1155, respectivamente. Com o aumento da concentração, a probabilidade de colisões entre partículas aumenta consideravelmente. Estas colisões consomem parte da energia cinética, tornando-as incapazes de escapar das áreas de vórtice, e induzem a formação de agregados, o que pode facilitar o acúmulo de partículas e obstrução dos canais de escoamento.

Além do diâmetro, a trajetória das partículas é também influenciada pelas características construtivas do canal dos labirintos. Aplicando um modelo numérico Yu et al. (2018c) estudaram o movimento de partículas com diâmetro de 130 µm em labirintos trapezoidais com defletores inclinados em 90°, 60°, 45° e 30° (Figura 7). Os resultados demonstraram que nos ângulos de 90° e 60° as partículas tendem a movimentar-se preferencialmente na região do fluxo principal do canal. Apenas para o ângulo de 60° uma pequena proporção de partículas desviou do fluxo principal e entraram na região formadora de vórtices. Para os ângulos de 45° e 30° as partículas desviaram com mais frequência da região do fluxo principal, atingindo a base do defletor e entrando algumas vezes na região dos vórtices, permanecendo em movimento circular por determinado tempo. Segundo os autores, reduções nos ângulos dos defletores elevaram a velocidade do fluxo no eixo Y, ou seja, na direção transversal ao comprimento do canal, fazendo com que as partículas fossem projetadas na direção dos vórtices, permitindo que se desviassem com facilidade do fluxo principal e entrasse nas áreas de recirculação e aumentando a amplitude do movimento entre o topo e a base do canal.

O ângulo dos defletores também afeta de forma significativa a velocidade de deslocamento da partícula. Yu et al. (2018c) observaram que nos emissores equipados com defletores inclinados em 90°, 60°, 45° e 30° (Figura 7) a velocidade média das partículas ao longo do labirinto foi de 1,37, 0,86, 0,50 e 0,41 m s⁻¹, respectivamente. As menores velocidades nos labirintos com defletores com ângulos menores são relacionadas aos desvios das partículas do fluxo principal durante o escoamento. Ao sair do fluxo principal e entrar nas áreas de vórtices, que apresentam baixa velocidade de escoamento, a velocidade da partícula diminui. Além do mais, nos ângulos menores, a partícula se choca constantemente com a parede do canal, fazendo com que a energia cinética diminua devido ao impacto, e sua velocidade seja reduzida. A redução da velocidade média combinada com entrada das partículas na região dos vórtices faz com que as partículas

permaneçam por mais tempo no interior do canal dos emissores, o que pode resultar no aumento da concentração de partículas no labirinto e resultar em sérias consequências.

Yu et al. (2018c) identificaram que ao reduzir o ângulo dos defletores de 90°, para 30°, a velocidade de escoamento do fluido na região dos vórtices diminuiu. Este efeito implica na redução da velocidade de deslocamento das partículas que entram na região de recirculação, o que reduz a força centrífuga da partícula e dificulta sua saída das regiões de vórtices. Assim, para labirintos com ângulo de defletores menores, quando a partícula entra no vórtice sua força inercial diminui, afetando o seu movimento, o que pode aumentar a suscetibilidade do emissor à obstrução.

2.9. Análise numérica de fluxo

Informações sobre as características de escoamento em labirintos de gotejadores são de fundamental importância em estudos relacionados ao desempenho hidráulico e antiobstrução de emissores utilizados na irrigação por gotejamento. A caracterização do fluxo nestes dispositivos tem sido realizada por meio da aplicação de modelos numéricos de fluxo utilizando CFDs (*Computational Fluid Dynamics*). Estes recursos permitem simular o escoamento no canal dos emissores e estimar a distribuição de pressão e de velocidades do fluxo no canal, facilitando realizar estimativas para relacionar a vazão e a pressão de operação de labirintos com diferentes formas e dimensões. Estas técnicas também podem gerar informações que permitam associar as características de escoamento no labirinto com locais suscetíveis a sedimentação de partículas no canal do labirinto, auxiliando os estudos relacionados à sensibilidade de emissores à obstrução (FENG et al., 2017; HAOSU et al., 2016; YU et al., 2018b, 2018c). De maneira geral, modelos de simulação apresentam boa estimativa das condições reais de escoamento nos labirintos (AL-MUHAMMAD; TOMAS; ANSELMET, 2016; FENG et al., 2017; WEI et al., 2006; ZHANG et al., 2007), auxiliando na fase de projeto de novos emissores e podendo reduzir o número de análises experimentais e o tempo de experimentos em laboratórios.

Existem diversos modelos numéricos que permitem realizar simulações do movimento de um fluido. Os modelos podem ser destinados a estimativas de escoamento em condições de fluxo laminar ou turbulento. No que se refere a estudos destinados ao escoamento em labirintos de emissores, a escolha do modelo de fluxo laminar ou o modelo de turbulência não é evidente, e por isso o modelo de CFD adotado difere de um estudo para outro. Enquanto Palau Salvador, Arviza Valverde e Bralts (2004) empregaram o modelo laminar para o estudo de escoamento em labirintos de gotejadores, outros pesquisadores recomendam a escolha de modelos para fluxo turbulento. Para emissores com números de Reynolds entre 75 e 550, Wei et al. (2006) escolheram o modelo turbulento *standard k-ε*, pois consideraram que este modelo numérico é normalmente aplicado para a maioria dos casos de engenharia, mesmo que tenha sido desenvolvido para fluxos totalmente turbulentos. O modelo turbulento RNG *k-ε* foi adotado por Wei et al. (2012). Este modelo é um refinamento do modelo *standard k-ε*, e é capaz de explicar o efeito de vórtices no escoamento. Estas características tornam o modelo RNG *k-ε* mais preciso e confiável para uma classe mais

ampla de fluxos do que o modelo *standard k-ε*. O modelo *realizable k-ε* também tem sido utilizado para simulação de fluxo em diferentes aplicações, sendo adotado por Dazhuang et al. (2007) para o estudo das características de escoamento em labirintos de emissores.

Todos os modelos *k-ε* calculam as condições de escoamento com a suposição de viscosidade turbulenta isotrópica, e não consideram a variação da curvatura da superfície ao longo do canal, que podem afetar a estrutura da turbulência. Por isto fluxos secundários em condutos não-circulares, que são dirigidos por tensões de Reynolds normais anisotrópicos, podem não ser previstos por estes modelos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). No caso dos labirintos de gotejadores, o fluxo normalmente é turbulento e anisotrópico (AL-MUHAMMAD et al., 2018), e por isso os modelos *k-ε* podem apresentar limitações no processo de estimativa das características de escoamento.

Por este motivo o *Reynolds stress equation model* (RSM) tem sido utilizado em estudos de escoamento em labirintos (JUN et al., 2007; ZHANG et al., 2010). Este modelo permite explicar os efeitos da curvatura da parede do canal, formação de fluxos secundários, fluxos rotacionais e mudanças rápidas na taxa de deformação do fluxo de uma maneira mais rigorosa. Outros modelos mais complexos, como o modelo LES (*Large Eddy Simulation*), foi utilizado por Wu et al. (2013) que compararam os resultados com o modelo *standard k-ε*. Eles identificaram que ambos os modelos apresentaram resultados satisfatórios, com desvio entre a vazão estimada e o valor experimental de 4,7% e 10,3% para os modelos LES e *standard k-ε*, respectivamente. No entanto, eles concluíram que o modelo LES pode ser mais efetivo em descrever as características de fluxo do fluido no canal do labirinto e por isso apresenta maior precisão dos dados simulados.

Devido à complexidade da geometria dos labirintos observa-se que não há um modelo numérico adequado para modelar o fluxo em canais de labirintos a fim de caracterizar e analisar o escoamento e determinar os campos de pressão e velocidade nos canais dos emissores. Em geral, o fluxo sofre várias mudanças de direção que induzem a formação de zonas de vórtice. A previsão destes vórtices normalmente é difícil com um modelo laminar, de modo que os modelos de turbulência tem sido os mais empregados para estudos das características de escoamento no fluido em labirintos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A execução deste estudo foi dividida em fases de projeto do labirinto, fabricação dos protótipos, validação hidráulica, ensaio de obstrução, e avaliação de desempenho. Os procedimentos executados em cada fase, assim como a disponibilidade de infraestrutura e recursos necessários para a execução da pesquisa, são descritos com mais detalhes ao longo deste documento.

Parte das etapas foram conduzidas no Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação (LEMI) do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, enquanto algumas das etapas relacionadas ao projeto dos labirintos foram desenvolvidas juntamente com a equipe do laboratório francês *Laboratoire d'Études et Recherches sur les Matériels d'Irrigation/Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture* (LERMI/IRSTEA).

3.1. Características geométricas dos labirintos dos protótipos

Foram projetados, construídos e avaliados 24 protótipos distintos de emissores planos, não regulados, com labirintos de formato trapezoidal e seção de escoamento retangular. Devido as características distintas de projeto, os protótipos foram classificados em dois grupos. No primeiro grupo, os protótipos estudados apresentam labirintos com características geométricas que proporcionam escoamento uniforme em toda a seção do canal e vórtices pouco desenvolvidos, sendo aqui denominados de emissores com escoamento uniforme (EU). Já os emissores pertencentes ao segundo grupo apresentam regiões que permitem o desenvolvimento de vórtices bem definidos e com diferentes magnitudes. Os emissores estudados neste segundo grupo são denominados de emissores com vórtice (EV). Em ambos os grupos, os labirintos dos emissores foram dimensionados para proporcionar vazões próximas a $1,4 \text{ L h}^{-1}$ operando sob pressão de 100 kPa, sendo que essas características e valores foram arbitrados nesse estudo.

A escolha dos dois grupos de emissores estudados está atrelada a fundamentos de processos de obstrução em emissores. Segundo Zhang et al. (2010) as regiões de vórtices apresentam baixa velocidade de escoamento e por isso proporcionam baixa capacidade de sustentação das partículas em suspensão, o que pode favorecer a sedimentação e acúmulo de partículas no canal de escoamento, levando o labirinto à obstrução. Baseado nisso, no início desta pesquisa, foi suposto que uma das formas de se reduzir a suscetibilidade dos emissores à obstrução seria a eliminação ou redução das regiões de baixa velocidade de escoamento, como as dos vórtices, favorecendo o transporte de partículas através do canal do emissor e minimizando o risco de sedimentação de partículas (FENG et al., 2017). O grupo de emissores de escoamento uniforme (EU) apresenta geometria e características de escoamento que minimizam zonas de vórtice. Por outro lado, como opção contrária, o grupo de emissores com vórtice (EV) favorece a formação de vórtices e, conforme discutido a frente, a avaliação de ambos os grupos evidenciou a importância da existência de vórtices no desempenho hidráulico do labirinto.

Para os emissores EU, as variáveis geométricas dos labirintos consideradas (Figura 10a) foram largura (W) e profundidade do canal (D), e ângulo do defletor (α), sendo que o comprimento da região 1 (Figura 10b) é duas vezes a largura do canal, enquanto que a região 2 apresenta comprimento igual à largura do canal. Os canais de escoamento foram projetados com seção transversal quadrada, ou seja, W é igual a D . Foram avaliados 4 valores de largura e profundidade do canal (0,5, 0,6, 0,7 e 0,8 mm) e 3 valores de ângulo do defletor (45, 60 e 75°), resultando em 12 combinações.

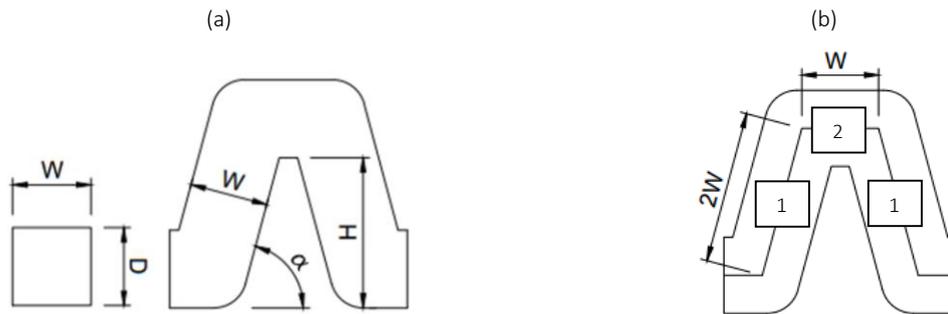


Figura 10. (a) Parâmetros geométricos dos protótipos do grupo EU: largura do canal (W), profundidade do canal (D), altura do defletor (H), ângulo do defletor (α); (b) dimensões adotadas no projeto dos protótipos do grupo EU

Para os emissores com características geométricas que permitem a formação de vórtices (EV), os parâmetros geométricos considerados foram largura do canal (W) e relação altura do defletor/largura do canal (H/W) (Figura 11). Foram avaliados 3 valores de largura de canal (0,7, 1,0, e 1,3 mm) e 4 valores de relação H/W (1,0, 1,2, 1,4 e 1,6), resultando em 12 combinações. Os parâmetros profundidade do canal (D) e ângulo do defletor (α) foram fixados em 0,8 mm e 75°, respectivamente.

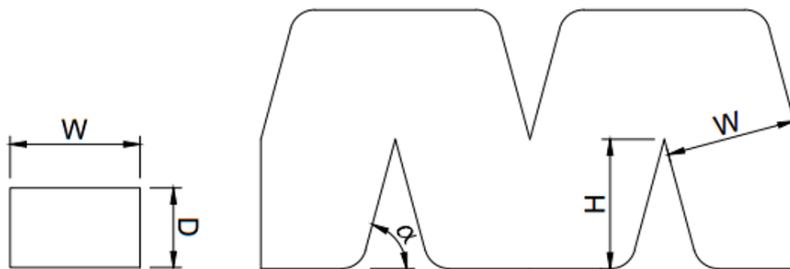


Figura 11. Parâmetros geométricos dos protótipos do grupo EV: largura do canal (W), profundidade do canal (D), altura do defletor (H), ângulo do defletor (α)

3.2. Projeto dos labirintos dos emissores

Para obter a vazão de projeto em cada uma das combinações, foi estimado o número de defletores (N) e conseqüentemente o comprimento do labirinto (L), conforme equacionamento descrito na sequência (ZHANG; ZHAO; LU, 2013; ZHANG et al., 2011). A energia é dissipada sob duas formas no canal de labirintos: uma ocorre nas seções retas do canal e é resultado das perdas viscosas durante o escoamento do

fluido; a outra é a perda localizada de carga associada às mudanças bruscas na direção do fluxo e dissipações devido aos vórtices. Os canais dos labirintos são normalmente compostos por uma série de defletores que apresentam a mesma forma, proporcionando mesma perda de carga por defletor quando as condições de fluxo são totalmente desenvolvidas (ADACHI; HASEGAWA, 2006). Portanto, conforme equacionamento proposto por Zhang et al. (2011), a queda total de pressão entre as seções de entrada e saída do labirinto (Δp) pode ser expressa como:

$$\Delta p = N(\Delta p_d + \Delta p_l) \quad (3)$$

$$\Delta p_d = f \frac{l}{D_h} \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \quad (4)$$

$$\Delta p_l = \zeta \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \quad (5)$$

$$\bar{u} = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

em que: Δp é a perda de carga total no labirinto (Pa); Δp_d e Δp_l são a perda localizada e perda distribuída de carga, respectivamente (Pa); N é o número de defletores; f é o fator de atrito; l é o comprimento da seção reta de um defletor (m); D_h é o diâmetro hidráulico (m); ρ é a massa específica do fluido (kg m^{-3}); \bar{u} é a velocidade média de escoamento (m s^{-1}); ζ é o coeficiente de perda localizada de carga; Q é a vazão do canal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); e A é a área da seção de escoamento (m^2).

Substituindo as equações (4), (5) e (6) em (3) temos:

$$\Delta p = N \left(f \frac{l}{D_h} + \zeta \right) \frac{\rho Q^2}{2 A^2} \quad (7)$$

Definindo uma variável φ como um coeficiente de perda total de carga por defletor equação (8), podemos observar que φ é um parâmetro adimensional que dependente do número de Reynolds, estrutura do canal, e da rugosidade da parede, e serve como indicador da perda de carga que ocorre em cada defletor do labirinto. Valores maiores de φ indicam características de escoamento que provocam maior perda de carga e permitem a obtenção de labirintos de menor comprimento e mais compactos.

$$\varphi = \left(f \frac{l}{D_h} + \zeta \right) \quad (8)$$

Substituindo a equação (8) na equação (7) e transformando temos:

$$Q = \sqrt{\frac{2 A^2}{N \rho \varphi}} \Delta p^{0,5} = k_\varphi \Delta p^{0,5} \quad (9)$$

em que:

$$k_\varphi = \sqrt{\frac{2 A^2}{N \rho \varphi}} \quad (10)$$

A equação (9) pode ser reescrita resultando na equação (11), proposta por Zhang et al. (2011) e Zhang et al. (2013).

$$\varphi = \frac{2 A^2 \Delta p}{N \rho Q^2} \quad (11)$$

Rearranjando a equação (11), é possível estimar o número de defletores, e consequentemente o comprimento do labirinto, pela equação (12) para dada vazão, pressão e seção de escoamento.

$$N = \frac{2 A^2 \Delta p}{\rho \varphi Q^2} \quad (12)$$

A determinação do número de defletores necessários para obter a vazão de projeto (1,4 L h⁻¹) foi realizada com auxílio de simulações numéricas utilizando o modelo *standard k-ε* por meio do software de fluidodinâmica computacional (CFD) COMSOL. A simulação numérica é um recurso que foi utilizado para simular o escoamento do fluido no interior dos labirintos e estimar a perda de carga ao longo de um segmento do labirinto composto por apenas 8 defletores que foram desenvolvidos utilizando software de desenho assistido por computador (CAD). Como condições de contorno para a simulação definiu-se a velocidade média de escoamento na entrada do primeiro defletor, correspondente a vazão de 1,4 L h⁻¹, e a pressão atmosférica no fim do labirinto, ou seja, na saída do oitavo defletor. Desse modo, o segmento de 8 defletores simulado corresponde a extremidade final de um labirinto de emissor. Com a simulação obteve-se a perda total de carga ao longo dos 8 defletores para cada geometria e então calculou-se o coeficiente de perda total de carga por defletor, isolando φ na equação 11. Conhecendo φ correspondente ao protótipo de labirinto e utilizando a equação 12 foi possível estimar o número de defletores necessário para dissipar a pressão de 100 kPa e obter a vazão de projeto (1,4 L h⁻¹).

Apesar de existirem diversos modelos numéricos para simulação de fluxo, neste estudo foi utilizado o modelo *standard k-ε*, sendo o único modelo destinado a escoamento turbulento disponível no software COMSOL. Esta etapa de simulação foi desenvolvida com o apoio da equipe de pesquisadores do laboratório francês *Laboratoire d'Études et Recherches sur les Matériels d'Irrigation/Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture* (LERMI/IRSTEA).

Na etapa de simulação o fluido no emissor foi água e, como condições de contorno, foi considerado fluido viscoso, incompressível, à temperatura ambiente e escoamento estacionário. As equações que governam o modelo *standard k-ε* são equação da continuidade:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

Equações de Navier-Stokes:

$$\rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (14)$$

em que: ρ é a massa específica do fluido (kg m⁻³); \mathbf{u} é a velocidade instantânea do fluido (m s⁻¹); i e j são índices que indicam a coordenada cartesiana; p é a pressão (Pa); t é o tempo (s); e \mathbf{x} é a coordenado do eixo no plano cartesiano (m); μ é a viscosidade dinâmica do fluido (kg m⁻¹ s⁻¹); μ_t é a viscosidade turbulenta (kg m⁻¹ s⁻¹).

Equações standard k-ε:

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (15)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (16)$$

G_k representa a geração (ou produção) de energia cinética turbulenta devido aos gradientes médios de velocidade:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \mu_t S^2 \quad (17)$$

em que: S é o módulo do tensor de taxa média de deformação, definido como:

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (18)$$

A viscosidade turbulenta pode ser escrita como um termo geral multiplicado por uma função de amortecimento, f_μ :

$$\mu_t = \rho f_\mu C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (19)$$

em que: k é a energia cinética turbulenta ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$); ε é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ($\text{m}^2 \text{s}^{-3}$); $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ε são constantes do modelo e assumem valores de 1,44, 1,92, 0,09, 1,0, e 1,3 respectivamente.

3.2.1. Estudos preliminares da simulação numérica de fluxo

3.2.1.1. Determinação do número de defletores a ser utilizado para simulação

O número de 8 defletores utilizados na fase de simulação numérica foi adotado mediante a testes previamente realizados. O teste foi desenvolvido para duas geometrias sendo uma com vórtice, com largura de canal de 1,3 mm e relação H/W de 1,0, e uma sem vórtice, largura do canal de 0,5 mm e ângulo do defletor de 45°. Para cada geometria foi simulado labirintos com 4, 6, 8, 10 e 12 defletores. Após as simulações foi estimado o número total de defletores (Tabela 4) para proporcionar a vazão de 1,4 L h⁻¹ na pressão de 100 kPa para cada uma das situações testadas.

Tabela 4. Teste do número de defletores a ser utilizado na fase de simulação para estimar o comprimento total do labirinto

Nº de defletores simulados	Nº de defletores para proporcionar vazão de 1,4 L h ⁻¹ na pressão de 100 kPa	
	Com vórtice $W=1,3$ mm e H/W de 1,0	Sem vórtice $W=0,5$ mm e ângulo de 45°
4	70	29
6	68	36
8	67	37
10	67	37
12	66	37

Os resultados indicaram que as simulações realizadas com oito defletores ou mais proporcionam praticamente o mesmo número de defletores para obter a vazão desejada. Desta forma, a utilização de um número maior que oito defletores na fase de simulação não é vantajosa, uma vez que o aumento do comprimento dos labirintos demanda maior recurso computacional.

3.2.1.2. Determinação da malha adequada para simulação numérica

Para realização dos cálculos, os CFDs utilizam o Método dos Volumes Finitos, na qual o domínio computacional (sólido 3D) é subdividido em subdomínios (volumes de controle) gerando a malha computacional. O refinamento da malha exerce influência direta nos resultados da simulação numérica, sendo que uma boa malha é capaz de evitar instabilidades e divergências da solução do problema. Por isso, deve-se verificar se a malha gerada é refinada o suficiente para que a solução independa da disposição de seus elementos. Isso é realizado individualmente para cada modelo, por meio de testes de independência na qual avalia-se a convergência e sensibilidade de malha.

Neste estudo as malhas computacionais foram compostas por elementos tetraédricos, na qual suas dimensões foram selecionadas de forma adequada, por meio do teste de independência, para obter resultados satisfatórios. O teste consistiu em realizar simulações com diferentes malhas e plotar os perfis de velocidades no primeiro e no quinto defletor obtidos para cada malha (Figura 12). Como o estudo avalia 24 geometrias de emissores com características distintas, a realização do teste de independência para todas as combinações demandaria elevado custo computacional. Por isso, o teste foi realizado para uma geometria dos labirintos com vórtice, com largura de canal de 1,3 mm e relação H/W 1,0, e uma geometria sem vórtice, com largura de canal de 0,5 mm e ângulo de defletor de 45° .

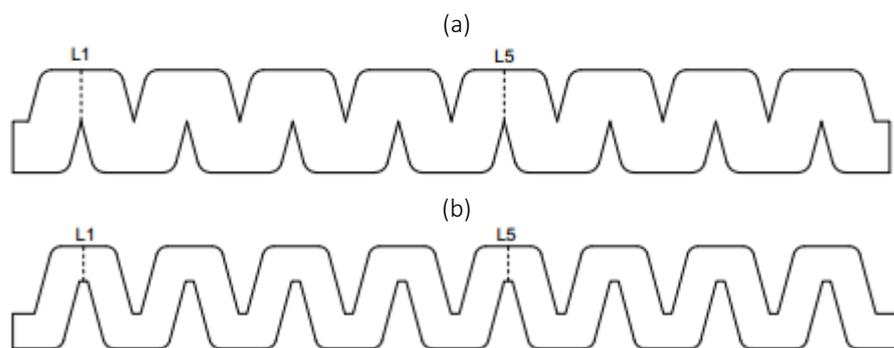


Figura 12. Indicação do local onde foram plotados o perfil de velocidade de escoamento no primeiro (L1) e no quinto defletor (L5) dos emissores EV (a) e EU (b)

Como cada combinação de geometria apresenta dimensões distintas é difícil obter o mesmo número de células para todas as geometrias estudadas. Com o objetivo de padronizar a construção das malhas, utilizou-se um recurso disponível pelo COMSOL que permite obter malhas de acordo com padrões pré-estabelecidos pelo software. Este recurso permite escolher a construção de malhas em padrões

qualitativos chamados de malha extremamente grossa, extra grossa, muito grossa, grossa, normal, fina, muito fina, extrafina, e extremamente fina.

Devido a limitações computacionais, foi realizado simulações apenas para malha grossa, normal, fina, e mais fina. Para o emissor EV o número de células foram de 94×10^3 , 301×10^3 , 639×10^3 , 986×10^3 e para o emissor EU foram de 55×10^3 , 180×10^3 , 377×10^3 , 1125×10^3 , respectivamente. O perfil de velocidade obtidos no primeiro e no quinto defletor para as geometrias EV e EU são apresentadas nas Figura 13 e Figura 14, respectivamente.

Além do teste de independência, o guia do usuário do COMSOL recomenda que a malha deve atender outros dois critérios. No primeiro a resolução da parede deve ser de 11,06 e a qualidade mínima do elemento deve ser maior que 10^{-4} . Ambos os requisitos foram atendidos para todas as 24 geometrias estudadas.

O teste de independência da malha mostrou que os padrões de malha fina e mais fina apresentam perfil de velocidade muito similares, indicando que os resultados das simulações em ambas não dependerão da malha. Por este motivo foi escolhido o padrão de malha fina para realização das simulações de todas as outras geometrias, pois a demanda computacional neste padrão é menor.

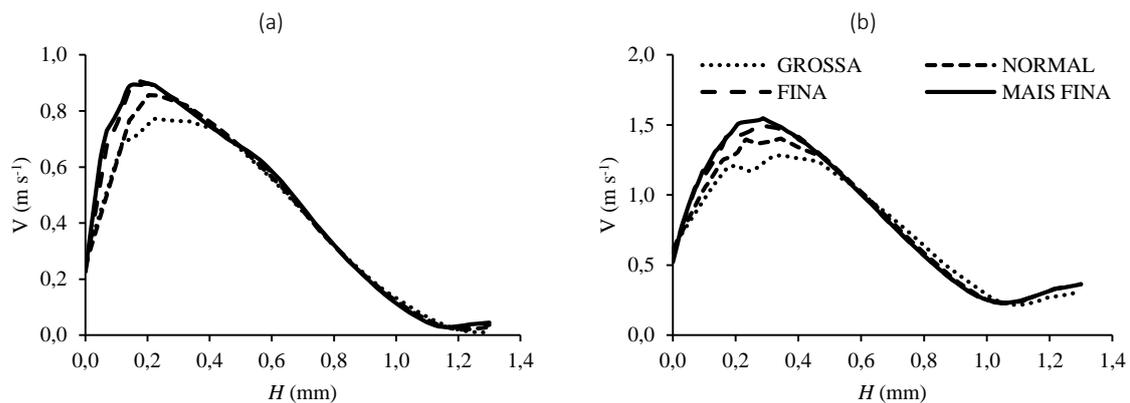


Figura 13. Teste de independência de malha para a geometria EV com largura de canal de 1,3 mm e relação H/W 1,0 no defletor 1 (a) e defletor 5 (b)

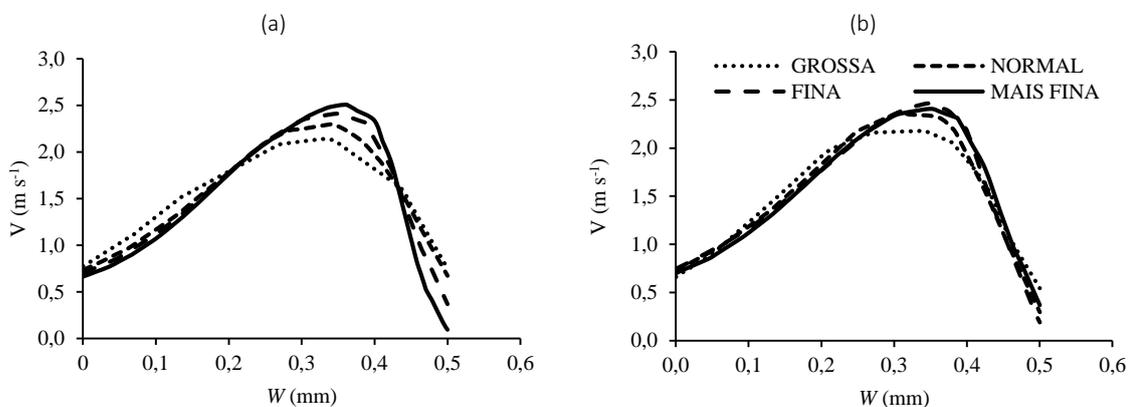


Figura 14. Teste de independência de malha para a geometria EU com largura de canal de 0,5 mm e ângulo de defletor de 45° no defletor 1 (a) e defletor 5 (b)

3.3. Fabricação dos protótipos de emissores

Após a estimativa do comprimento dos labirintos foi realizado o processo de fabricação dos protótipos estudados. O objetivo foi a fabricação de emissores que apresentassem características similares aos labirintos utilizados comercialmente, porém que possibilitassem o estudo de seu interior durante o funcionamento e que permitissem que a estrutura fosse desmontada para a realização da limpeza do interior do canal, possibilitando a reutilização do protótipo.

A construção dos labirintos foi realizada utilizando uma fresadora com Comando Numérico Computadorizado (CNC), com resolução de 0,01 mm, equipada com fresa raiada de 0,5 mm de diâmetro, 3,0 mm de corte, 3,2 mm de diâmetro da haste (Figura 15). A fresagem foi realizada em placas de polimetilmetacrilato (PMMA), também conhecido como acrílico, com espessura de 2 mm, e comprimento e a largura variável em função das dimensões do labirinto.

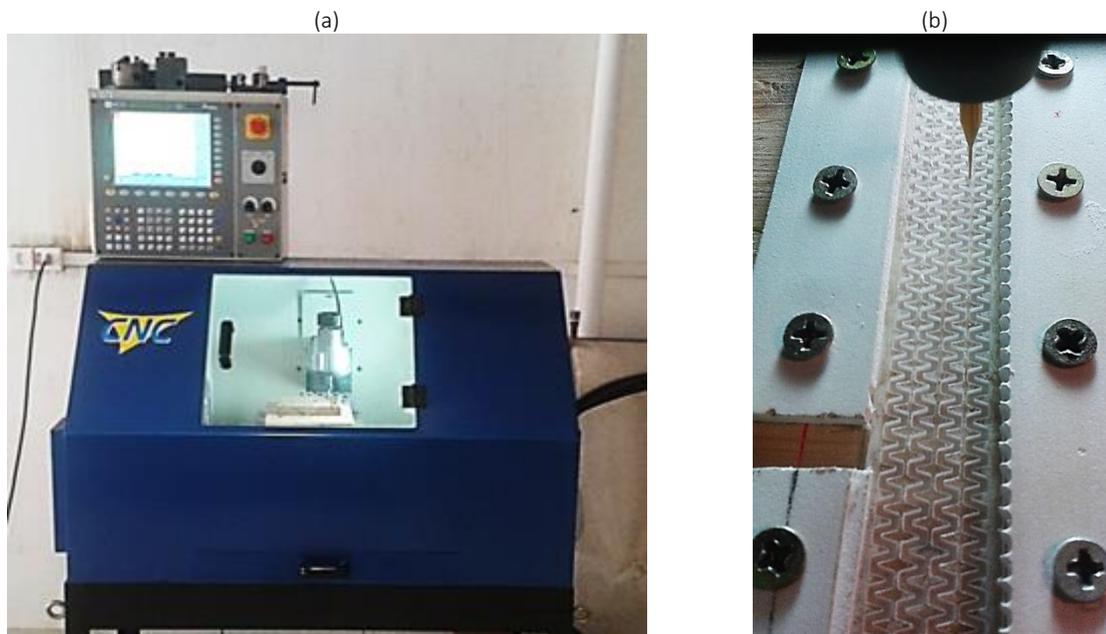


Figura 15. Fresadora CNC utilizada para confecção dos canais do labirinto (a), fresa e esquema de fixação da placa de acrílico na mesa da CNC durante o processo de usinagem

Para realização da usinagem os labirintos foram criados em 2D em CAD e posteriormente importados para um software de Manufatura Assistida por Computador (CAM). Este software permitiu gerar um código em forma de coordenadas na linguagem Código G no padrão ISO, sendo a linguagem reconhecida pela máquina CNC, permitindo que a placa de acrílico fosse usinada. As principais vantagens desse método consistiram na possibilidade de fabricação de canais com dimensões reduzidas, com elevada precisão, e redução do custo de obtenção dos protótipos, uma vez que o LEMI dispõe de uma fresadora CNC, permitindo assim a realização de todas as fases da pesquisa no próprio local.

As placas com os labirintos usinados foram montadas em um acessório permitindo que o protótipo opere de forma semelhante aos emissores comerciais em situações de campo. O acessório foi

composto por um tubo de nylon com diâmetro externo, diâmetro interno e comprimento de 41, 18, e 150 mm, respectivamente. A placa de acrílico com o labirinto foi apoiada sobre o tubo de nylon em uma superfície nivelada com largura e comprimento de 33 e 117 mm respectivamente. A fim de evitar vazamentos, entre o tubo de nylon e a placa de acrílico foi colocado duas peças de silicone emborrachado, a primeira com espessura de 0,8 mm e outra com 1,9 mm, com largura e comprimento iguais ao da placa contendo o canal de escoamento. Entre as duas peças de silicone foi adicionado uma folha de papel alumínio utilizado para a melhoria do contraste a fim de facilitar a visualização interna do labirinto. A entrada de água no labirinto ocorreu por um orifício com área de $16,56 \text{ mm}^2$ que liga a parte interna do tubo de nylon ao início do canal do labirinto. Sobre a placa de acrílico foi instalada uma placa de vidro responsável por fechar o canal e permitir o escoamento da água. Essa placa foi fabricada em vidro comum de 8 mm de espessura, com 115 mm de comprimento e 60 mm de largura. Para finalizar, a estrutura é sustentada por uma armação metálica fixada por parafusos e porcas. A representação esquemática dos componentes e o acessório montado é apresentado na Figura 16.

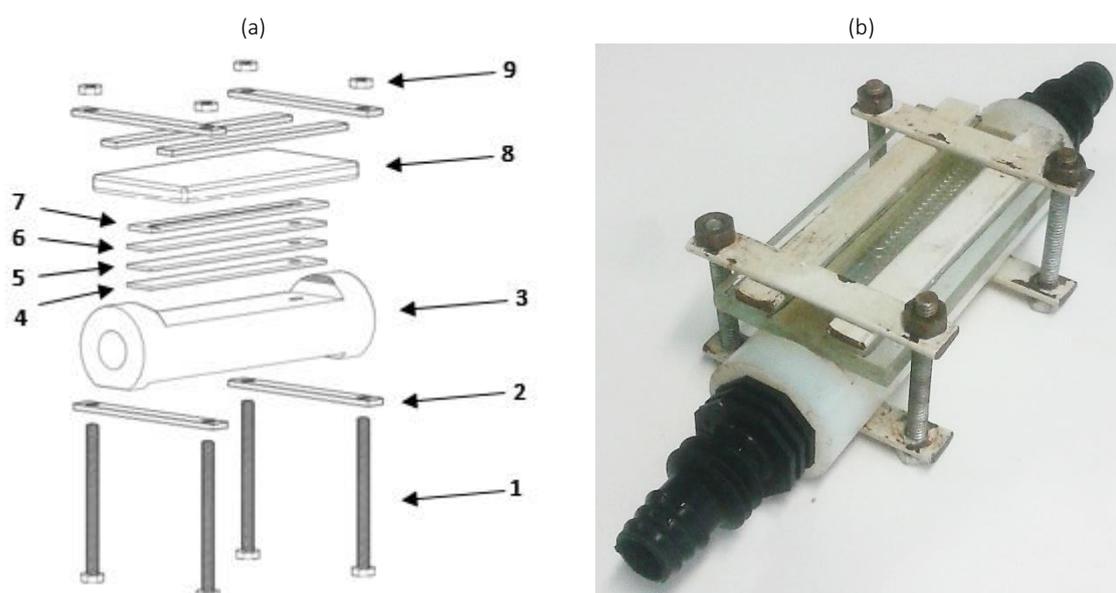


Figura 16. Representação esquemática das peças utilizadas no acessório (a): parafuso (1), armação metálica (2), tubo de nylon (3), placa de silicone (4), folha de papel alumínio (5), placa de silicone (6), placa contendo o labirinto (7), placa de vidro (8), porcas (9); e acessório montado para execução do ensaio (b)

3.4. Experimentos para avaliação hidráulica dos emissores

Foram realizados ensaios em laboratório, com água potável, para a determinação da relação vazão-pressão (equação 1) dos protótipos de labirintos. Para a condução dos experimentos foi utilizada uma bancada de ensaios caracterizada por um circuito hidráulicamente fechado (Figura 17). A bancada era composta por um reservatório com capacidade de 250 L e um conjunto motobomba da marca KSB modelo Hydrobloc P500 com pressão máxima de 392,26 kPa e vazão máxima de $2,4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. No recalque da bomba foi instalado um filtro de disco com abertura de 120 μm para reter eventuais partículas contaminantes. Duas

válvulas do tipo agulha foram instaladas para ajuste da pressão de ensaio e recirculação de água. Na entrada da linha foi instalado um manômetro digital (faixa de medição de 0 a 500 kPa, resolução de 0,1 kPa, incerteza expandida de 0,5% em relação ao fundo de escala) para o monitoramento da pressão de ensaio. Foram avaliados 4 protótipos simultaneamente, espaçados em 0,20 m. O final da linha contendo os protótipos foi fechado a fim de minimizar perdas de carga na linha de condução de água e assegurar a mesma pressão de ensaio em todos os protótipos. A vazão de cada protótipo foi determinada por meio da massa de água coletada de cada emissor em um período de 30 min. Os emissores foram avaliados sob 7 pressões entre 50 e 350 kPa em incrementos de 50 kPa.

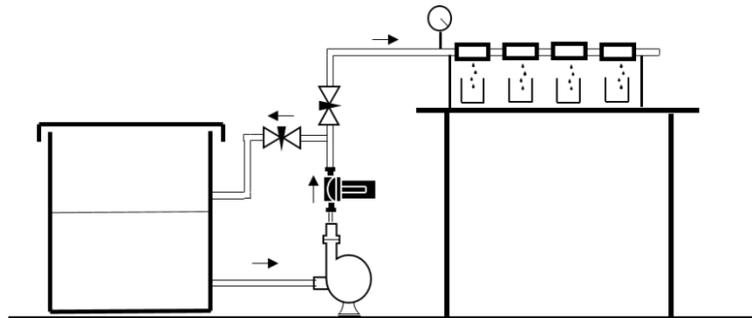


Figura 17. Representação da bancada de ensaio utilizada para determinação da relação vazão-pressão dos protótipos: reservatório (1), conjunto motobomba (2), filtro de disco (3), registros tipo agulha para controle do retorno de água e para ajuste da pressão de ensaio (4), manômetro digital (5), protótipos (6) e coletores (7)

3.5. Modelagem da vazão dos emissores por regressão não linear

Neste estudo foi considerado que a vazão dos labirintos é influenciada principalmente pelas propriedades físicas do fluido (massa específica e viscosidade), características geométricas do labirinto (largura e profundidade do canal, e altura e ângulo do defletor) e pela pressão de operação.

Com o objetivo de obter uma equação para fácil estimativa da vazão dos emissores construídos e dispensar o uso de simulações computacionais para futuros modelos similares, foram avaliados diversos modelos matemáticos, sendo que o modelo apresentado na equação (20) se ajustou aos dados experimentais, sendo capaz de estimar satisfatoriamente a vazão de todos os protótipos avaliados. Para o ajuste dos coeficientes do modelo utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados e a ferramenta Solver do Microsoft Excel®. O modelo foi determinado empiricamente com base na interpretação física do fenômeno, considerando-se que o expoente de fluxo da equação (1) é influenciado principalmente pelo ângulo do defletor (α), visto que este exerce significativo impacto no coeficiente de perda de carga total em cada defletor (φ) e conseqüentemente nas características de escoamento no labirinto. Modelos de regressão não linear baseados em potências tem sido empregados com sucesso para a modelagem de processos relacionados a diversos fenômenos hidráulicos (PERBONI et al., 2015; VEKARIYA; SUBBAIAH; MASHRU, 2011; VILAÇA et al., 2017; ZITTERELL; FRIZZONE; RETTORE NETO, 2014).

$$q = \beta_1 \nu^{\beta_2} L^{\beta_3} A^{\beta_4} \alpha^{\beta_5} h^{\beta_6} (\alpha)^{\beta_7} \quad (20)$$

em que q é a vazão estimada do emissor ($L h^{-1}$); ν é a coeficiente de viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$); L é o comprimento do labirinto (m); A é a seção de escoamento do labirinto (m^2); α é o ângulo do defletor (radianos); h é a carga de pressão (m); β_i são os coeficientes de ajuste do modelo.

3.6. Ensaio de obstrução

Para avaliação da sensibilidade à obstrução, os protótipos foram submetidos à condição de operação utilizando água contendo partículas sólidas em suspensão sendo realizada duas repetições do ensaio. A estrutura utilizada para realizar os ensaios, o método de obtenção das partículas sólidas e a forma com que os ensaios foram conduzidos é descrito a seguir.

3.6.1. Bancada de ensaio

A bancada utilizada durante os ensaios de obstrução foi composta por um reservatório com formato de tronco de cone e capacidade de 250 L, para armazenamento da mistura com partículas sólidas e um agitador com hélice que manteve a água em constante movimento e as partículas em suspensão, sendo a haste e a hélice fabricados em aço inoxidável a fim de evitar oxidação e contaminação da mistura água/areia. Foi acoplado ao reservatório um conjunto motobomba com rotor e carcaça de nylon, evitando oxidação do rotor e desprendimento de partículas metálicas, da marca DANCOR, modelo CP-4R com potência de ¼ CV, vazão nominal de $5,29 m^3 h^{-1}$ e pressão nominal de 113,75 kPa, responsável por bombear a solução contendo partículas sólidas para um tubo com diâmetro nominal de 20 mm conectado aos emissores. A velocidade de escoamento na linha foi de $0,7 m s^{-1}$ controlado por um bocal de 4,4 mm de diâmetro instalado no fim da linha lateral. A pressão de operação foi monitorada por um manômetro digital (faixa de medição de 0 a 500 kPa, resolução de 0,1 kPa, incerteza expandida de 0,5% em relação ao fundo de escala) instalado no início da linha. Os emissores foram instalados sobre uma calha de PVC responsável por coletar e conduzir ao reservatório a água emitida pelos protótipos. No início da calha foi instalada uma mangueira com a finalidade de manter escoamento constante de água, evitando acúmulo de partículas sobre a calha. No fim da calha, sobre o reservatório foi instalado uma peneira com abertura de 0,5 mm com o objetivo reter e evitar a recirculação de partículas contaminantes no sistema. A Figura 18 apresenta a bancada com mais detalhes identificando cada componente.

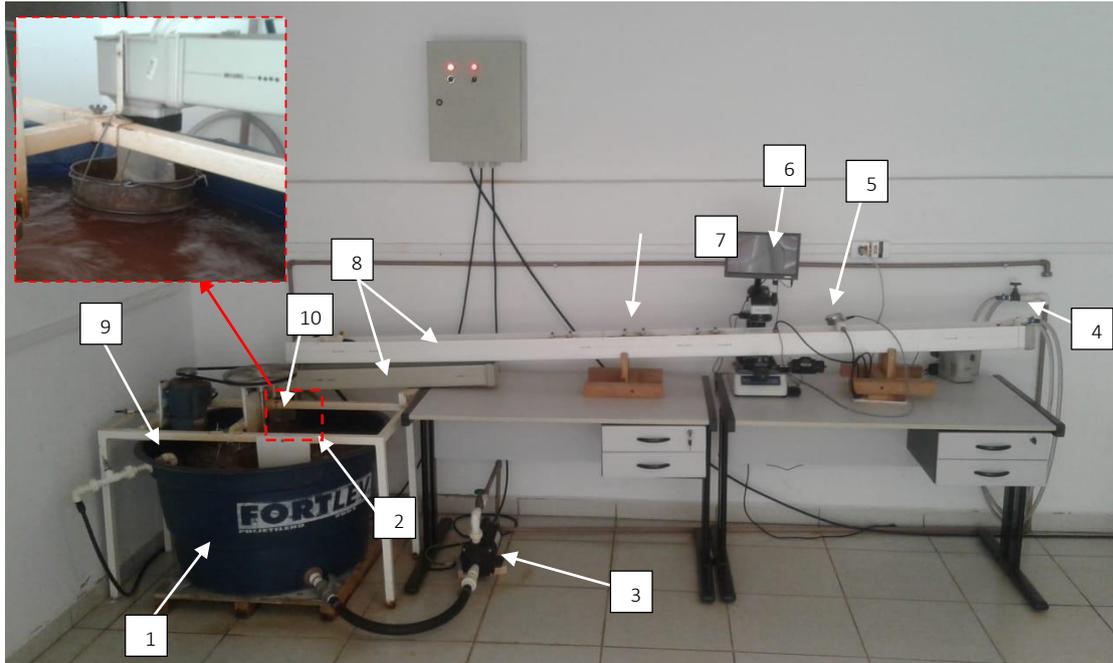


Figura 18. Bancada de ensaio com reservatório (1), agitador mecânico (2), conjunto motobomba (3), registro de gaveta e entrada de água para a linha dos gotejadores (4), manômetro (5), kit com microscópio e câmera para visualização do labirinto (6), gotejadores (7), calha para retorno da água ao reservatório (8), bocal para controle da velocidade de escoamento da água no tubo (9), peneira para retenção de contaminantes (10)

3.6.2. Partículas sólidas utilizadas para os ensaios de obstrução

As partículas sólidas utilizadas para avaliação da sensibilidade dos protótipos à obstrução foram constituídas por uma mistura de argila, silte e areia. A argila e o silte foram provenientes do solo disponível na ESALQ, enquanto que a areia foi obtida a partir de agregados miúdos (areia de construção), utilizada em obras. Essa areia foi escolhida por apresentar menor quantidade de material orgânico, como raízes e outras impurezas, diminuindo a probabilidade de problemas de obstrução causadas por materiais indesejáveis.

Para obtenção das partículas de argila e silte, foi realizado um processo de preparação do solo conforme a norma ISO 11277 (2009), que estabelece o procedimento para análise granulométrica de solo, adotando métodos de destruição de matéria orgânica e dispersão da argila. Após o processo de dispersão, o material foi lavado com jato de água destilada em peneira com abertura de 44 μm . O material que passou pela peneira foi coletado e seco em estufa a 105 °C. A obtenção da areia consiste apenas na coleta e lavagem do material, eliminando as impurezas.

Após a preparação, o material foi dividido em diversas faixas granulométricas, como mostra a Tabela 5, sendo a utilização dessa faixas justificada no próximo tópico. Depois da separação, a faixa granulométrica correspondente à areia foi colocada em mufla a 550 °C por um período de 3 horas, seguindo procedimentos recomendados para incinerar a matéria orgânica presente na areia (CARMO; SILVA, 2012).

Tabela 5. Faixas granulométricas utilizadas no experimento

Faixa	Faixa granulométrica (μm)
1	0 – 75
2	75 – 125
3	125 – 212
4	212 – 500

Para a separação da areia foi adotado procedimento proposto por Lavanholi (2016). O método consiste em utilizar um conjunto de peneiras granulométricas sobrepostas sobre um agitador mecânico, possibilitando a separação das partículas em 15 intervalos (Tabela 6). Após a classificação, cada faixa granulométrica da Tabela 5 foi obtida por meio da combinação do material que ficou retido em cada peneira utilizando a equação (21). A quantidade de partículas, separada por cada peneira, adicionada para formar cada faixa é proporcional à diferença entre a máxima e a mínima granulometria que fica retida na peneira. Por exemplo, a faixa 2 (75 a 125 μm) foi composta pela combinação das partículas retidas nas peneiras 9 (106 a 125 μm), 10 (90 a 106 μm) e 11 (75 a 90 μm). A peneira 9 retém partículas com intervalo de 19 μm de diâmetro, valor superior à 16 e 15 μm retidas pelas peneiras 10 e 11 respectivamente. Com diferença de 50 μm entre a maior e a menor granulometria a ser utilizada na faixa 2 (75 a 125 μm), o intervalo das partículas retidas pela peneira 9 representa maior proporção, sendo então responsável por contribuir com 38% da concentração da faixa granulométrica enquanto que as peneiras 10 e 11 contribuem com 32 e 30% respectivamente. A curva de distribuição granulométrica do material de obstrução a ser utilizado nos ensaios é apresentada na Figura 19.

$$CP_i = \frac{DFP_i - DIP_i}{DFF_j - DIF_j} 100 \quad (21)$$

em que CP é a contribuição da peneira i na concentração da faixa granulométrica (%); i é número da peneira; DFP é o diâmetro final de partícula retido na peneira (μm); DIP é o diâmetro inicial de partícula retido na peneira (μm); DFF é o diâmetro final de partícula na faixa granulométrica (μm); DIF é o diâmetro inicial de partícula na faixa granulométrica (μm); e j é o número da faixa granulométrica.

Tabela 6. Peneiras utilizadas para separação dos intervalos de diâmetro de partículas e contribuição de cada intervalo na composição da faixa granulométrica do material nos ensaios de obstrução

Faixa granulométrica (μm)	Nº da peneira	Malha da peneira (ASTM)	Intervalo de diâmetro de partículas retidas por cada peneira (μm)	Contribuição do intervalo na faixa granulométrica (%)
500 - 212	1	40	$425 \leq \text{int.} < 500$	26,04
	2	45	$355 \leq \text{int.} < 425$	24,31
	3	50	$300 \leq \text{int.} < 355$	19,10
	4	60	$250 \leq \text{int.} < 300$	17,36
	5	70	$212 \leq \text{int.} < 250$	13,19
212 - 125	6	80	$180 \leq \text{int.} < 212$	36,78
	7	100	$150 \leq \text{int.} < 180$	34,48
	8	120	$125 \leq \text{int.} < 150$	28,74
125 - 75	9	140	$106 \leq \text{int.} < 125$	38,00
	10	170	$90 \leq \text{int.} < 106$	32,00
	11	200	$75 \leq \text{int.} < 90$	30,00
75 - 0	12	230	$75 \leq \text{int.} < 75$	16,00
	13	270	$53 \leq \text{int.} < 63$	13,33
	14	325	$45 \leq \text{int.} < 53$	10,67
	15	Fundo	< 45	60,00

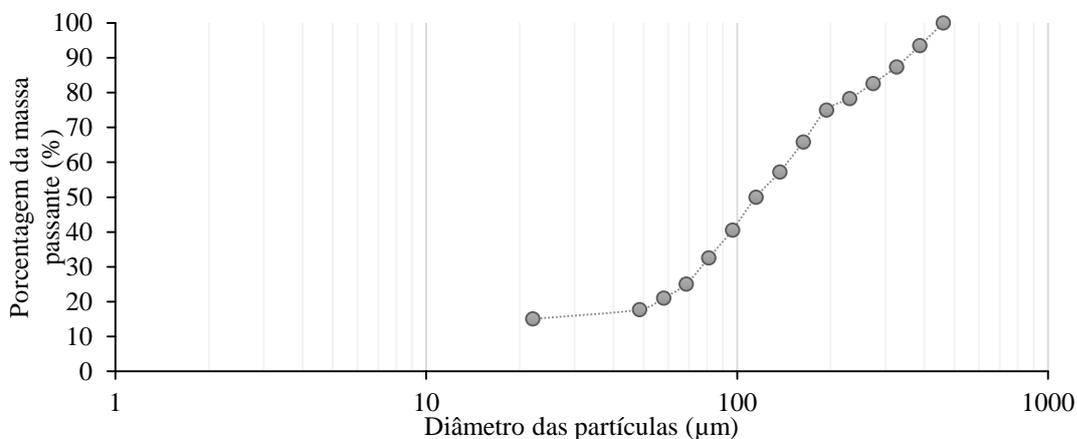


Figura 19. Curva de distribuição granulométrica do material de obstrução utilizado para os ensaios experimentais

3.6.3. Condução do ensaio de obstrução

Durante os ensaios foram avaliados três protótipos de emissores simultaneamente, instalados em série, utilizando água deionizada com o propósito de padronizar as condições iniciais de ensaio e reduzir a possibilidade de ocorrência de obstrução por outras fontes como química ou biológica. Também foram realizados o monitoramento do pH, condutividade elétrica, e temperatura da água durante o processo de medição de vazão, utilizando pHmetro e condutivímetro de bancada (Modelo DM 22 e DM 32, respectivamente).

Os ensaios foram iniciados determinando-se a vazão inicial dos emissores, utilizada como referência para determinação da redução da vazão devido a obstrução ao longo do experimento. Após essa etapa, as partículas sólidas foram adicionadas ao reservatório, dando início ao ensaio de obstrução.

A metodologia de ensaio executada nesse trabalho foi uma simplificação do procedimento utilizado pelo laboratório francês *Laboratoire d'Études et Recherches sur les Matériels d'Irrigation/ Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture* (LERMI/IRSTEA) que tem utilizado uma metodologia para avaliação de produtos comerciais há aproximadamente 40 anos. O procedimento original é dividido em 4 etapas, cada uma com duração de 40 h de funcionamento, operando 8 h diárias, 5 dias na semana, com duração total de 4 semanas, totalizando 160 h de funcionamento. As concentrações e as faixas granulométricas das partículas sólidas utilizadas em cada etapa no protocolo francês são especificadas na Tabela 7.

Tabela 7. Distribuição da concentração das faixas granulométricas em cada etapa

Etapa	Tempo (h)	Faixa granulométrica das partículas (μm)				Concentração total (mg L^{-1})
		< 75	75 - 125	125 - 212	212-500	
1	0 – 40	125	-	-	-	125
2	40 – 80	125	125	-	-	250
3	80 – 120	125	125	125	-	375
4	120 – 160	125	125	125	125	500

Com o objetivo de acelerar o procedimento de ensaio, optou-se por trabalhar somente com a etapa 4 do procedimento francês, sendo considerada como a condição que configura maior risco de obstrução. A última etapa contém todas as faixas granulométricas e a maior concentração de partículas, permitindo avaliar a sensibilidade do gotejador à obstrução em apenas uma semana, sendo que se fosse utilizado o protocolo francês de forma integral seriam necessárias 4 semanas de ensaio. Dessa forma, cada ensaio foi conduzido durante 5 dias consecutivos em regime intermitente, operando 8 horas diárias, resultando em 40 horas de ensaio.

A vazão dos gotejadores foi monitorada ao fim de cada dia (após as oito horas de funcionamento), obtida pela equação (22) utilizando a massa coletada manualmente para cada emissor, num tempo igual a 30 min, e a massa específica da água. O tempo de coleta de água para as determinações de vazão foi relativamente longo e visa assegurar adequada incerteza de medição. Após o quinto dia de cada ensaio, foi realizada a higienização da bancada, lavando-se e limpando-se todos os componentes. Essa etapa buscou garantir que todos os ensaios fossem conduzidos com as mesmas condições iniciais.

$$q = \frac{m \ 60}{1000 \ t \ \rho} \quad (22)$$

em que q é a vazão do emissor (L h^{-1}); m é a massa de água coletada (g); t é o tempo de coleta (min); e ρ é a massa específica da água (kg m^{-3}).

3.7. Avaliação de desempenho dos protótipos de emissor

Nesta fase foi realizada a avaliação do desempenho dos emissores operados sob condições de risco de obstrução. A análise foi baseada sobre dois principais aspectos: 1º) quantitativo: avaliando a vazão relativa, que é a razão entre a vazão atual e vazão inicial de cada emissor (equação 23); e 2º) qualitativo: identificando os locais com acúmulo de partículas no labirinto dos emissores. Foi avaliado apenas um emissor para cada combinação geométrica, devido ao elevado tempo necessário para a fabricação dos protótipos e de ensaio, inviabilizando a construção e o ensaio de diversos emissores para uma mesma geometria. Sobretudo a fabricação de várias peças com as mesmas características geométricas adicionaria mais uma fonte de variação no estudo e não contribuiria para o entendimento dos processos de obstrução que constituem o foco desse trabalho.

Os modelos que apresentaram razão entre a vazão atual e a vazão inicial do emissor inferior a 75% foram considerados como obstruídos. Esse critério tem sido proposto por diversos autores em trabalhos na área de obstrução de emissores (QINGSONG et al., 2008; WEI et al., 2008; ZHANG et al., 2011, 2017). Após o término dos ensaios, os dados foram plotados em gráficos contendo a razão entre as vazões em função do tempo de ensaio. Dessa forma, foi possível verificar o desempenho dos emissores e identificar a sensibilidade de cada modelo à obstrução.

$$q_r = 100 \frac{q_a}{q_0} \quad (23)$$

em que q_r é a vazão relativa do emissor (%); q_a é a vazão atual do emissor ($L \cdot h^{-1}$); q_0 é a vazão inicial do emissor, operando sob dada pressão de operação e com água limpa ($L \cdot h^{-1}$).

As informações sobre o comportamento das partículas nos labirintos e os locais que ocorrem o acúmulo foram determinadas por meio de imagens e filmagem dos canais durante o funcionamento do sistema. Para isso, foi instalado uma lupa de bancada Mitutoyo modelo TM e uma câmera com resolução de 2 Megapixel/1080p que proporciona a visualização dos pequenos labirintos estudados. O procedimento de filmagem também possibilitou identificar capacidade de autolimpeza dos labirintos, ou seja, após a sedimentação de partículas verificar se há ou não a remoção das partículas acumuladas pelo fluxo da água. As fotografias foram tiradas em diversos pontos do labirinto, principalmente nos primeiros defletores dos canais, no final das 8 h de funcionamento do sistema ao longo dos cinco dias de operação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características do escoamento no canal dos labirintos

As características do escoamento no canal dos labirintos para a vazão de 1,4 L h⁻¹ foram avaliadas por meio do campo de velocidade e distribuição das linhas de corrente obtidas por meio das simulações numéricas. Para os emissores EU as características de escoamento no quinto defletor são apresentadas na Figura 20.

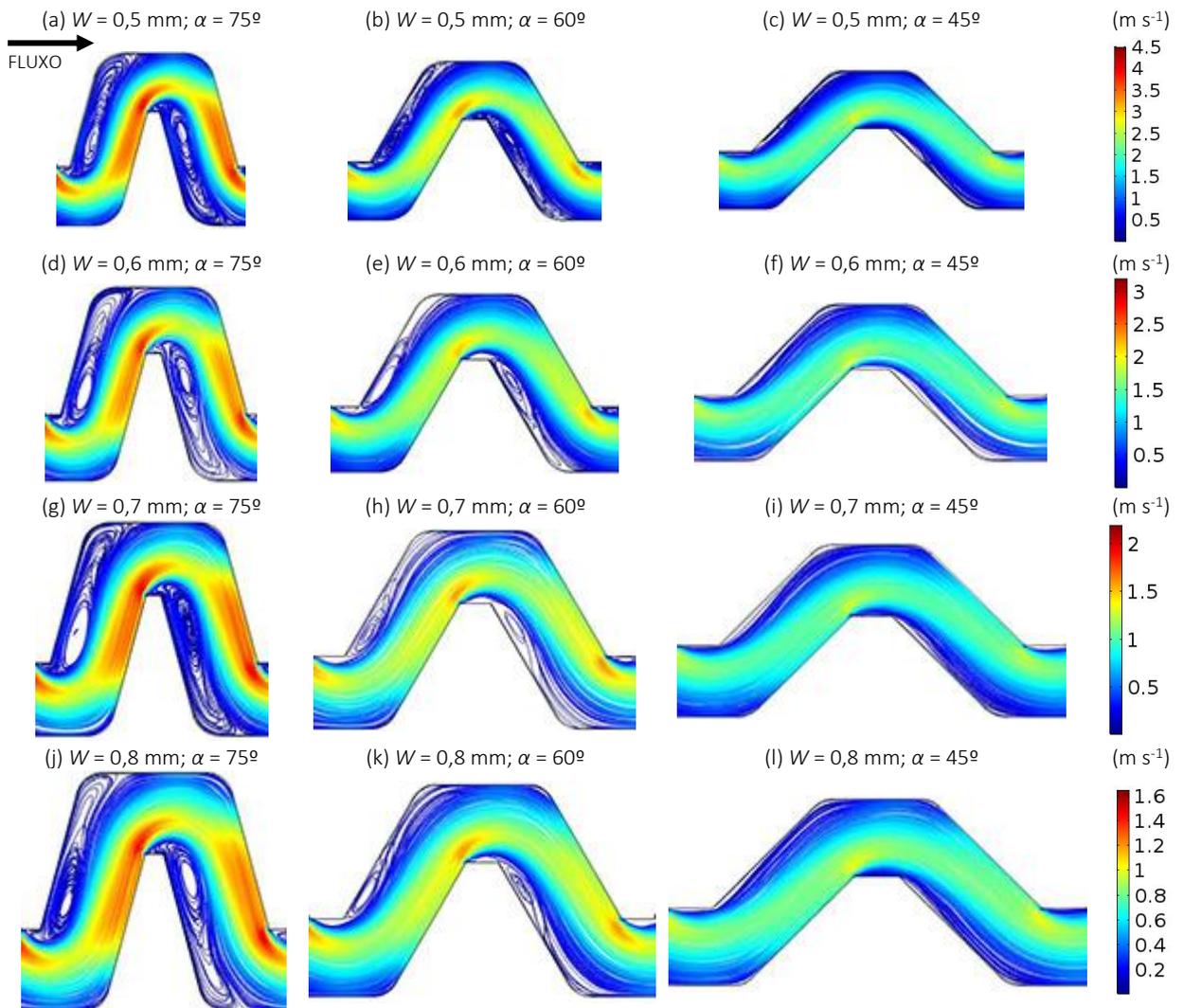


Figura 20. Campo de velocidade média (m s^{-1}) e as linhas de corrente no quinto defletor para os emissores EU obtidas pela simulação numérica

Observa-se que para dado ângulo de defletor, as diferentes larguras de canal resultam em escoamento com as mesmas características. No entanto, ao comparar o campo de velocidade e distribuição das linhas de corrente entre os três ângulos estudados podemos observar que nos labirintos com defletores inclinados em 45° o escoamento é mais uniforme, com linhas de fluxo sempre na mesma direção e sentido

em toda seção do canal, enquanto que nos emissores com ângulo de defletor de 60° e 75° é observado a ocorrência de duas regiões com escoamento de características distintas. A primeira região apresenta velocidades de escoamento elevadas, denominada de fluxo principal, enquanto a segunda é uma pequena região de recirculação com formato prolongado atrás dos defletores, chamadas de vórtices e caracterizadas por apresentarem baixa velocidade de escoamento.

O campo de velocidade e as linhas de corrente obtidas a partir da simulação numérica na quinta unidade defletora dos emissores EV, para a vazão de $1,4 \text{ L h}^{-1}$ são apresentados na Figura 21.

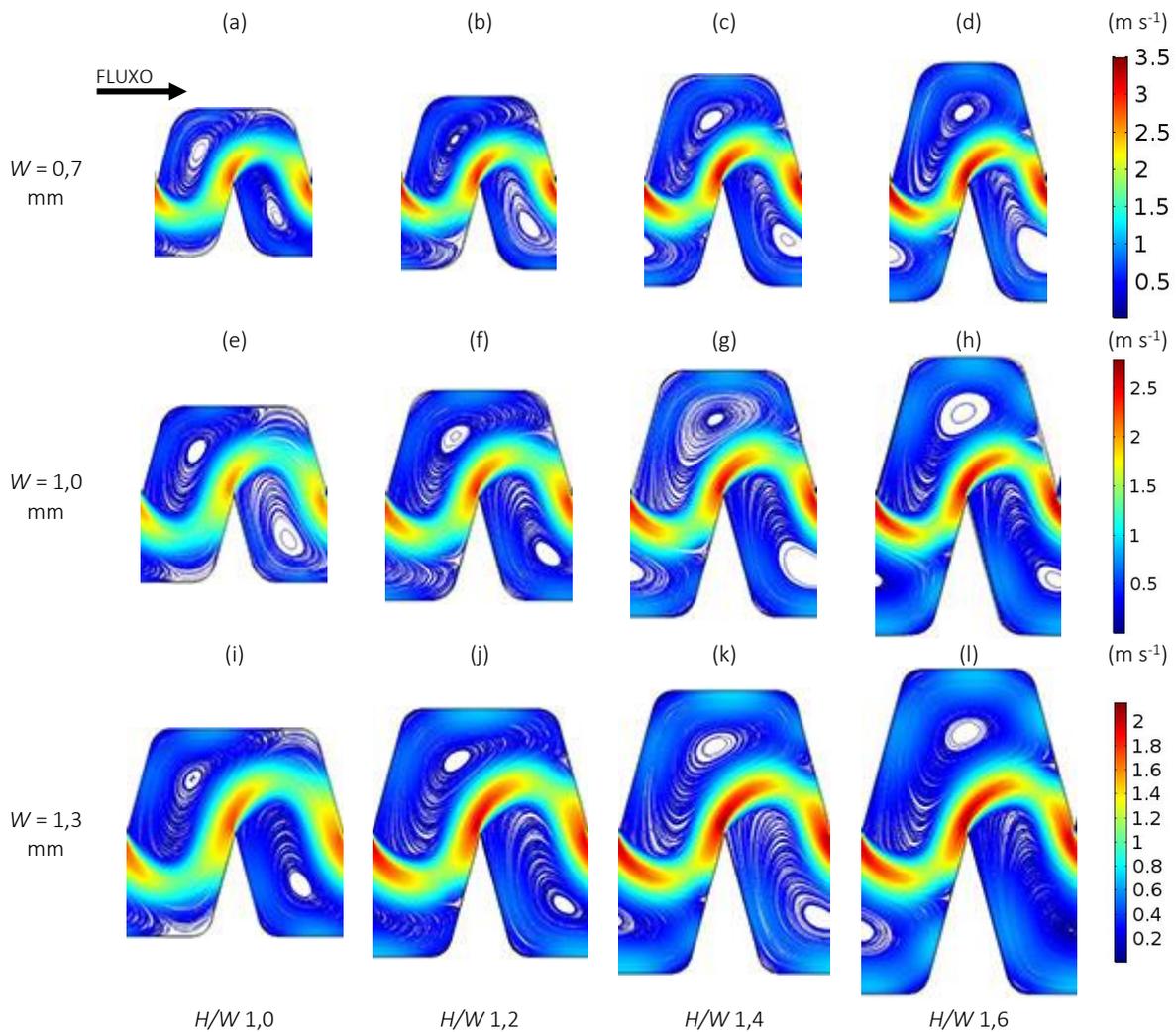


Figura 21. Campo de velocidade (m s^{-1}) e as linhas de corrente na quinta unidade defletora para os emissores EV obtidas pela simulação numérica

Para este grupo de emissores também foi observado a existência de uma região de fluxo principal, que neste caso move-se na forma de “S” no centro do labirinto com elevada velocidade de escoamento, e a ocorrência de regiões vórtices, com baixa velocidade de escoamento localizadas nas regiões posteriores aos defletores e periféricas do canal.

As regiões formadoras de vórtices foram significativamente alteradas quando a altura dos defletores aumentou, permitindo a formação de vórtices mais desenvolvidos e fluxo de maior quantidade

de fluido nesta região. Por outro lado, as variações na relação H/W não afetaram de forma significativa o formato da região do fluxo principal.

Com a finalidade de representar a proporção do tamanho total de uma unidade defletora ocupada pela região dos vórtices, a Figura 22 apresenta as regiões de recirculação delimitadas para cada relação H/W dos emissores com largura de canal de 1,3 mm. Quantificando as dimensões dos vórtices, para as três larguras de canais estudadas, observou-se que as regiões de recirculação representam em média 61, 71, 74, e 76% do volume total da unidade defletora para as relações H/W de 1,0, 1,2, 1,4, e 1,6 respectivamente.

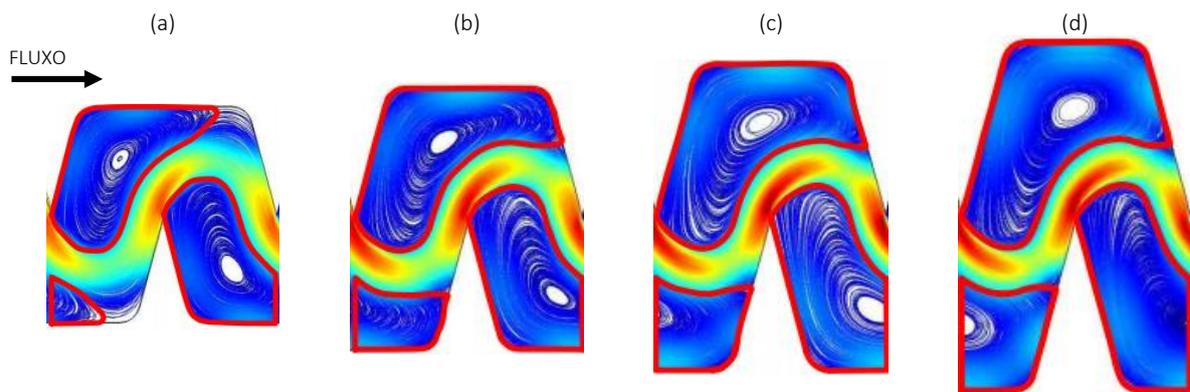


Figura 22. Regiões formadora de vórtices delimitadas nos labirintos com largura de canal de 1,3 mm para as relações H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)

Observa-se que o escoamento nos emissores EU e EV apresentaram características distintas. Para os emissores EU o escoamento é mais uniforme com vórtices pequenos ou até mesmo inexistentes, como é o caso dos emissores com ângulo de defletores de 45° . Por outro lado, os emissores EV apresentam regiões que permitem a formação de vórtices bem desenvolvidos, na qual podemos chamar de câmara de vórtices. Essas câmaras são zonas mortas e não contribuem para a condução da água para fora do labirinto, uma vez que o fluxo responsável pela vazão do emissor escoar na região central do canal. A diferença nas características de escoamento entre os dois grupos de emissores se deve à sobreposição dos defletores nos emissores EU que eliminam essas zonas mortas e permitem que praticamente toda a seção do canal contribua com o escoamento normal do volume de fluido que passa pelo labirinto, o que poderia ser comparado à um microtubo recurvado.

Características de escoamento similares foram observadas nos labirintos estudados por Dazhuang et al. (2007). Ao avaliar o efeito da altura dos defletores nas características de escoamento, os autores identificaram que para canais com relações entre altura do defletor e largura do canal igual a 1, as regiões de vórtices foram totalmente desenvolvidas e com velocidades de escoamento relativamente elevadas nas regiões de recirculação. Ao aumentar a altura do defletor e permitir a sobreposição dos defletores, os autores observaram que as regiões de recirculação diminuíram, tornando-se prolongadas, e fazendo com que a velocidade de escoamento na região periférica do vórtice fosse reduzida. Estes resultados indicam que uma das formas de se reduzir a formação dos vórtices e seu efeito sobre as condições de escoamento é adotar características construtivas que permitam a sobreposição dos defletores.

Para representar de forma detalhada a distribuição da velocidade das linhas de fluxo no canal dos emissores foram plotados os perfis de velocidade de escoamento na seção transversal no quinto defletor de cada geometria estudada. O perfil de velocidade de escoamento foi plotado na linha tracejada (L5) na Figura 23, local que permitiu a identificação de maior número de detalhes sobre o fluxo, identificando regiões de baixa velocidade de escoamento, vórtices e região de fluxo principal.

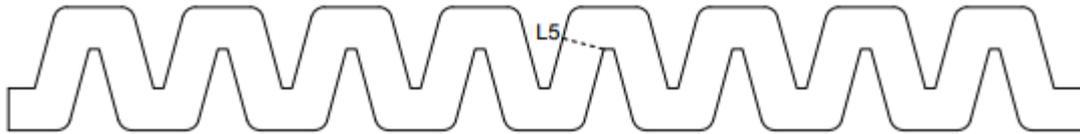


Figura 23. Indicação do local onde foram plotados o perfil de velocidade de escoamento no quinto defletor (L5) dos emissores EU

Para este grupo de emissores os perfis de velocidade são apresentados na Figura 24. Na região do fluxo principal, local de maior velocidade de escoamento, observou-se que o aumento do ângulo dos defletores resultou em elevações no pico de velocidade de escoamento. Para os ângulo de defletores de 45°, 60° e 75° foram observados, respectivamente, velocidades máximas de 2,70, 3,38, e 4,15 m s⁻¹, nos emissores com largura de canal de 0,5 mm; 1,91, 2,35, e 2,62 m s⁻¹ nos emissores com largura de canal igual a 0,6 mm; 1,38, 1,59, e 1,96 m s⁻¹ para canais de 0,7 mm; e 1,05, 1,25, e 1,48 m s⁻¹ para labirintos com canais com largura de 0,8 mm. Em geral, incrementos de 15° e 30° no ângulo dos defletores aumentaram a velocidade máxima de escoamento em aproximadamente 20 e 43%, respectivamente. As diferenças entre as velocidades máxima nos emissores com largura de canais distintas é justificada pela diferença da velocidade média de escoamento entre emissores para proporcionar a vazão de 1,4 L h⁻¹.

Avaliando a velocidade de escoamento próximo à parede esquerda do canal do labirinto, observa-se que as menores velocidades ocorrem nos labirintos com ângulos de 60°, com valores entre 0,014 e 0,062 m s⁻¹, enquanto que nos labirintos com defletores inclinados em 45° e 75° as velocidades de escoamento são mais elevadas, variando entre 0,077 e 0,45 m s⁻¹.

Nos labirintos com defletores inclinados em 75° observa-se ainda que inicialmente a velocidade de escoamento reduz, alcançando valores próximo a zero na distância entre 0,1 e 0,13 mm, e posteriormente aumenta de forma progressiva. Esse comportamento se deve pela presença das zonas de recirculação nas regiões posteriores aos defletores, sendo que os pontos velocidade zero representam o centro do vórtice.

Do ponto de vista antiobstrução, os padrões de escoamento nos labirintos com defletores inclinados em 60° não apresentam comportamento desejável. Os locais de baixa velocidade de escoamento podem favorecer a sedimentação de partículas sólidas e causar deficiências na limpeza da parede do canal em condições em que possa ocorrer aderência de partículas. Por outro lado, nos labirintos com ângulo de 75°, a presença de regiões com velocidade próximo a zero, como no centro dos vórtices, pode favorecer o acúmulo de partículas e obstruir o canal dos emissores (JUN et al., 2007; WEI et al., 2012; ZHANG et al., 2010).

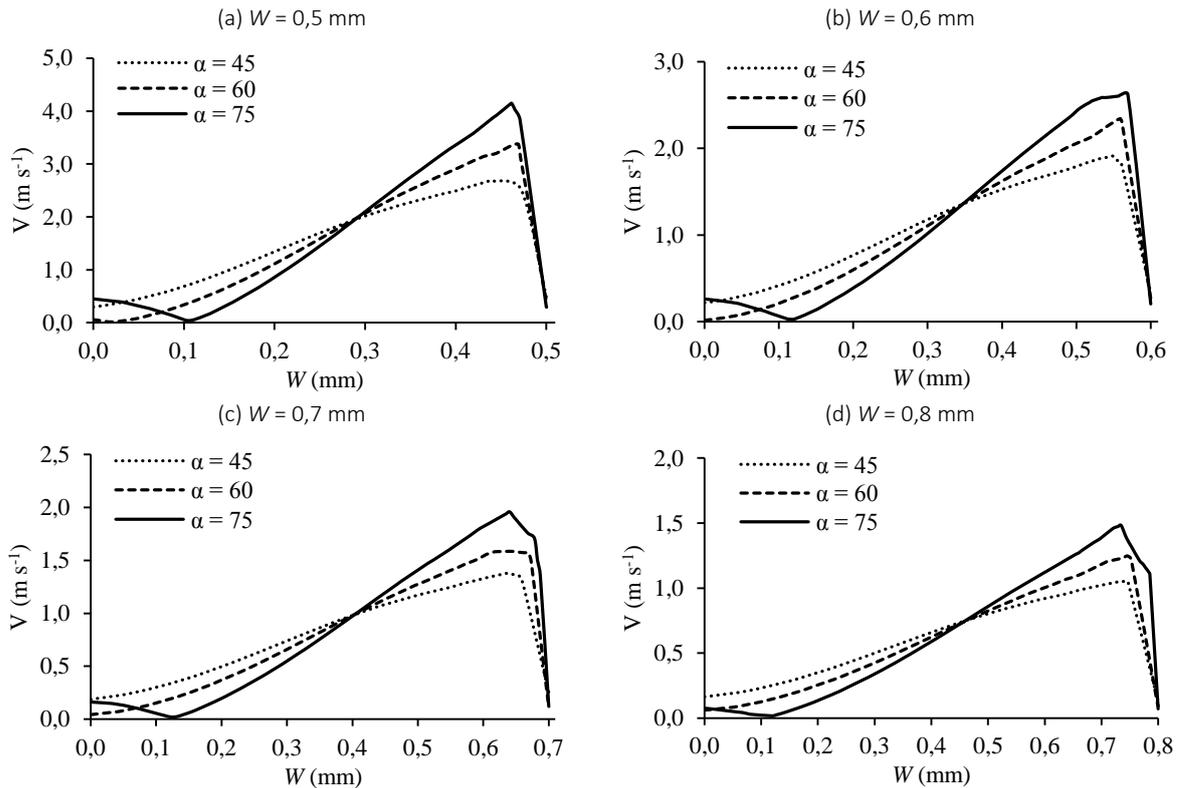


Figura 24. Perfil do módulo da velocidade de escoamento na linha do defletor 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,5 mm (a), 0,6 mm (b), 0,7 mm (c), e 0,8 mm (d)

Para emissores com características construtivas que permitem o escoamento uniforme no canal do labirinto o efeito das variações no ângulo do defletor é diferente comparado aos labirintos que proporcionam a formação de vórtices. Adotando a mesma forma de representação para o ângulo dos defletores utilizado neste estudo, Dazhuang et al. (2007) observaram que ao reduzir o ângulo dos defletores a velocidade de escoamento na região próxima a parede do canal diminuiu, afetando significativamente a velocidade nas regiões dos vórtices. Neste estudo foram observadas tendências diferentes, uma vez que os ângulos de 75° e 45° apresentam velocidades de escoamento maiores próximo a parede do canal comparado aos emissores com ângulo de 60° .

Os perfis de velocidade plotados no quinto defletor (L5 na Figura 25) dos emissores do grupo EV é apresentado na Figura 26. Nos perfis os pontos de maior velocidade estão associados às regiões do fluxo principal, enquanto as regiões de vórtices são representadas pelas faixas de baixa velocidade de escoamento.

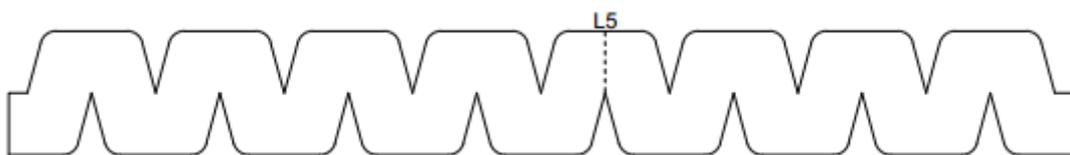


Figura 25. Indicação do local onde foram plotados o perfil de velocidade de escoamento no quinto defletor (L5) dos emissores EV

Pelos resultados obtidos a partir das simulações numéricas podemos observar que o perfil de velocidade nos emissores com relação H/W de 1,6 e 1,4 são muito similares e apresentam os maiores valores de velocidade de escoamento no fluxo principal, enquanto que emissores com a relação H/W de 1,0 apresentaram escoamentos com velocidades menores nesta região. A máxima velocidade de escoamento na região do fluxo principal dos labirintos com relação H/W de 1,6 é superior em 16, 28, e 16 % em relação aos labirintos com H/W de 1,0 para emissores com largura de canal de 0,7, 1,0, e 1,3 mm respectivamente.

Além de proporcionar regiões de recirculação com maiores dimensões o aumento da relação H/W elevou a velocidade de escoamento na região periférica dos vórtices para labirintos de mesma largura. Para H/W de 1,0, 1,2, 1,4 e 1,6 as máximas velocidades de escoamento na região dos vórtices, próximo a parede do canal, foram de 0,43, 0,71, 0,89, e 0,92 m s^{-1} , para os emissores com largura de canal de 0,7 mm; 0,43, 0,69, 0,83, e 0,84 m s^{-1} , para os emissores com largura de canal de 1,0 mm; e 0,44, 0,67, 0,72, e 0,69 m s^{-1} ; para canais de 1,3 mm de largura, respectivamente.

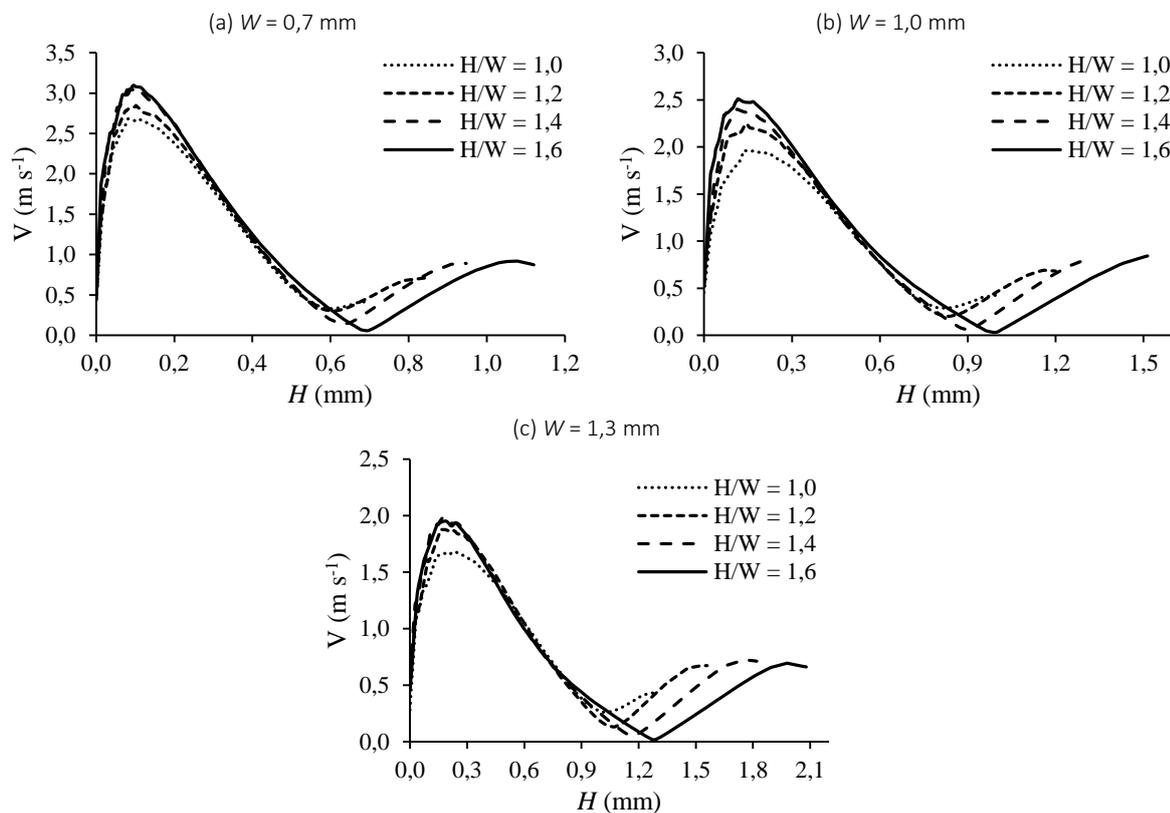


Figura 26. Perfil da velocidade de escoamento no quinto defletor dos emissores EV

Ao aumentar o tamanho das áreas de recirculação, as velocidades de escoamento na região do fluxo principal e vórtices aumentaram de forma significativa. Os emissores com maiores câmaras de vórtices permitem o movimento de maior quantidade de fluido na região de recirculação, que ao retornar para o fluxo principal eleva a velocidade de escoamento nesta região. As maiores velocidades no fluxo principal para as relações H/W de 1,4 e 1,6 indicam que a energia cinética do fluido é mais elevada, permitindo que

o fluido entre com maior velocidade na câmara de vórtices e movimenta-se mais rapidamente na região periférica das áreas de recirculação.

Os vórtices são regiões com baixa velocidade de escoamento e por isso possibilitam a deposição e acúmulo de partículas no interior do canal (AL-MUHAMMAD; TOMAS; ANSELMET, 2016; WEI et al., 2012). Por apresentarem vórtices de maiores dimensões, assume-se que os emissores com relações H/W mais elevadas apresentem maior suscetibilidade ao problema de obstrução. Por outro lado, o aumento da relação H/W elevou a velocidade de escoamento na região do fluxo principal e dos vórtices, o que pode melhorar a capacidade de autolimpeza e reduzir a probabilidade de sedimentação de partículas nesta região, melhorando a resistência do labirinto à obstrução. O projeto de labirintos que permitem a formação de vórtices bem desenvolvidos e com velocidades de escoamento mais elevadas na região periférica tem sido recomendado pela literatura, uma vez que esta estratégia permite a lavagem das paredes do canal e redução da probabilidade de sedimentação de partículas no canal (FENG et al., 2017).

A fim de observar a evolução do fluxo no canal dos labirintos, é apresentado na Figura 27 e Figura 28 o campo de velocidade média e as linhas de corrente obtidas pela simulação numérica para a vazão de $1,4 \text{ L h}^{-1}$ nos quatro primeiros defletores dos emissores EU e EV, respectivamente. Para representar a evolução do fluxo escolheu-se apenas uma largura de canal de cada grupo de emissor, uma vez que o desenvolvimento do fluxo não foi afetado pela largura do canal. Os labirintos escolhidos foram os de largura de $0,7 \text{ mm}$ para o grupo EU e largura de $1,0 \text{ mm}$ para o grupo EV.

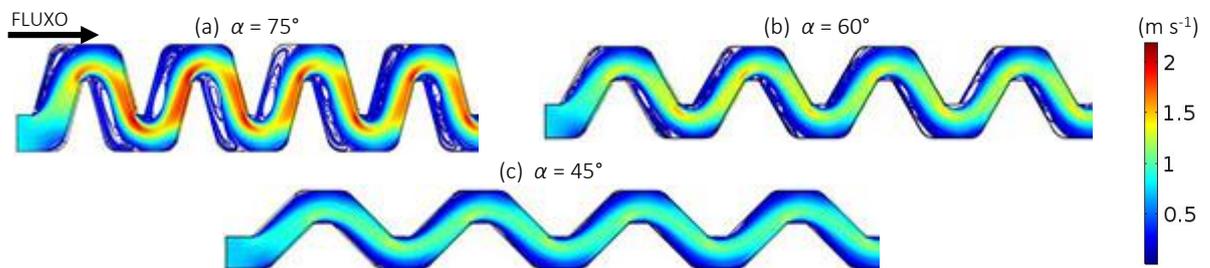


Figura 27. Campo de velocidade média (m s^{-1}) e as linhas de corrente nos quatro primeiros defletores para os emissores EU com largura de canal de $0,7 \text{ mm}$

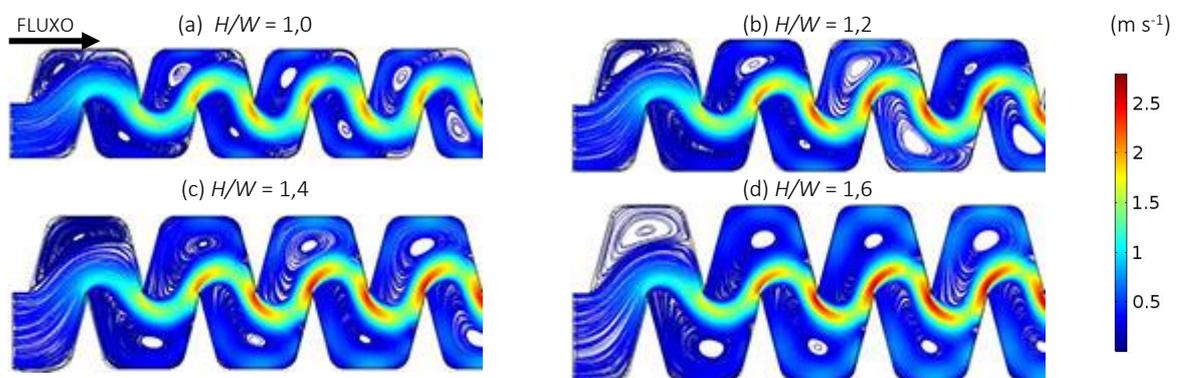


Figura 28. Campo de velocidade média (m s^{-1}) e as linhas de corrente nos quatro primeiros defletores para os emissores EV com largura de canal de $1,0 \text{ mm}$

Em geral, para o grupo de emissores EU os resultados das simulações demonstram que as linhas de escoamento do fluido nos primeiros defletores são muito similares aos demais defletores, apresentando pequenas diferenças somente no início dos canais com defletores inclinados em 60° e 75° . Já para os emissores do grupo EV foi observado que o escoamento no início do canal apresenta características distintas. Os vórtices no primeiro defletor são pouco desenvolvidos, com dimensões menores e com velocidade de escoamento inferior aos demais. O escoamento na região do fluxo principal também apresentou características distintas, com escoamento mais amplo e uniforme, e com picos de velocidades inferior aos defletores posteriores.

Para analisar de forma detalhada o desenvolvimento do fluxo no canal de cada labirinto EU foram plotados os perfis de velocidade de escoamento na seção transversal nos defletores 1, 2, 3, e 5 para cada geometria, representados na Figura 29 por L1, L2, L3, e L5, respectivamente. Para os emissores com largura de canal de 0,5, 0,6, 0,7, e 0,8 mm, os perfis são apresentados nas Figura 30, Figura 31, Figura 32, e Figura 33 respectivamente.

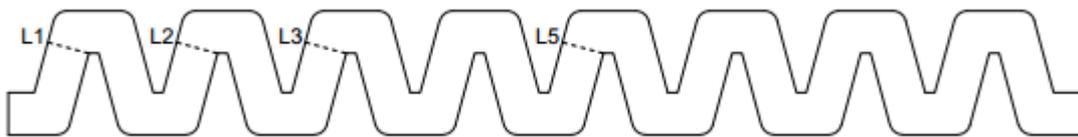


Figura 29. Indicação dos locais onde foram plotados os perfis de velocidade de escoamento nos emissores EU no defletor 1 (L1), defletor 2 (L2), defletor 3 (L3), e defletor 5 (L5)

Em geral, as diferenças entre os perfis de velocidades plotados nos diferentes defletores são pequenas, apresentando praticamente as mesmas tendências. Isto indica que emissores com estas características geométricas são capazes de apresentar rápida estabilização do fluxo no labirinto.

Observa-se que as diferenças mais acentuadas entre os perfis de velocidade nos diferentes defletores ocorrem para os labirintos com defletores inclinados em 75° . Em geral, no primeiro defletor a velocidade de escoamento na região do fluxo principal é um pouco inferior aos defletores posteriores, indicando que o fluxo nesta região ainda não é totalmente estável. Essa característica possivelmente é decorrente da má formação do vórtice no início do canal, como pode ser visto na Figura 27.

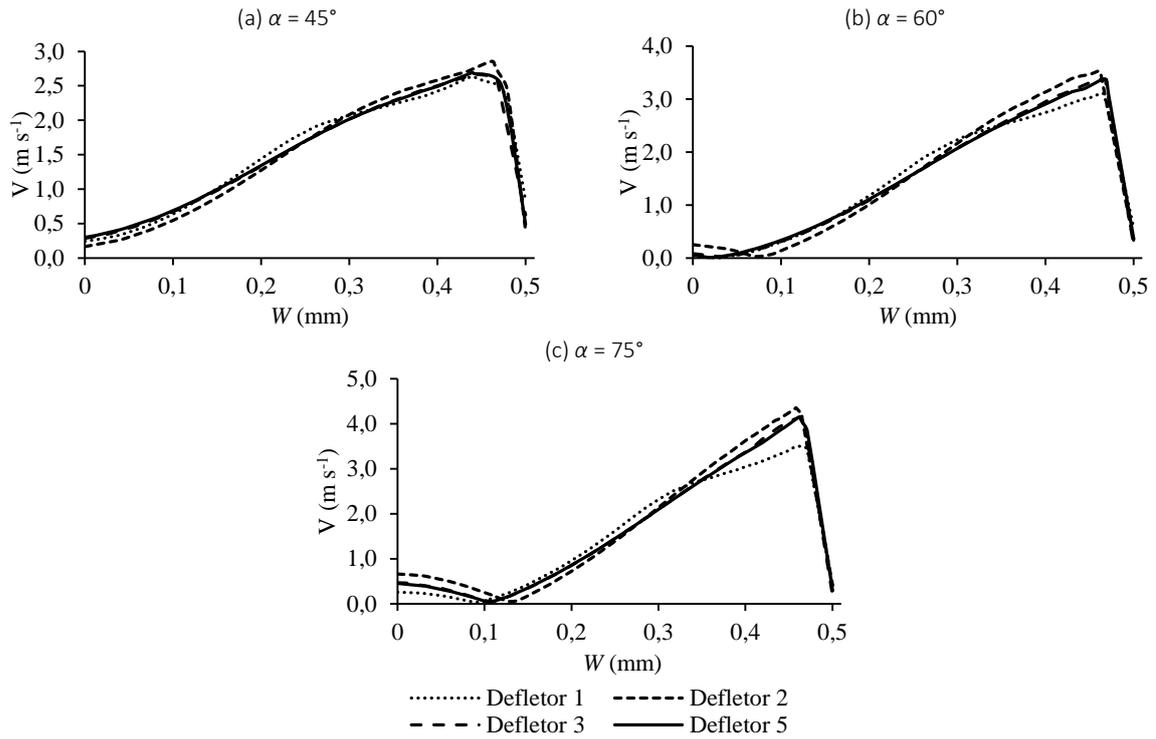


Figura 30. Perfil de velocidade de escoamento nos defletores 1, 2, 3, e 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,5 mm com ângulo do defletor de 45° (a), 60° (b), 75° (c)

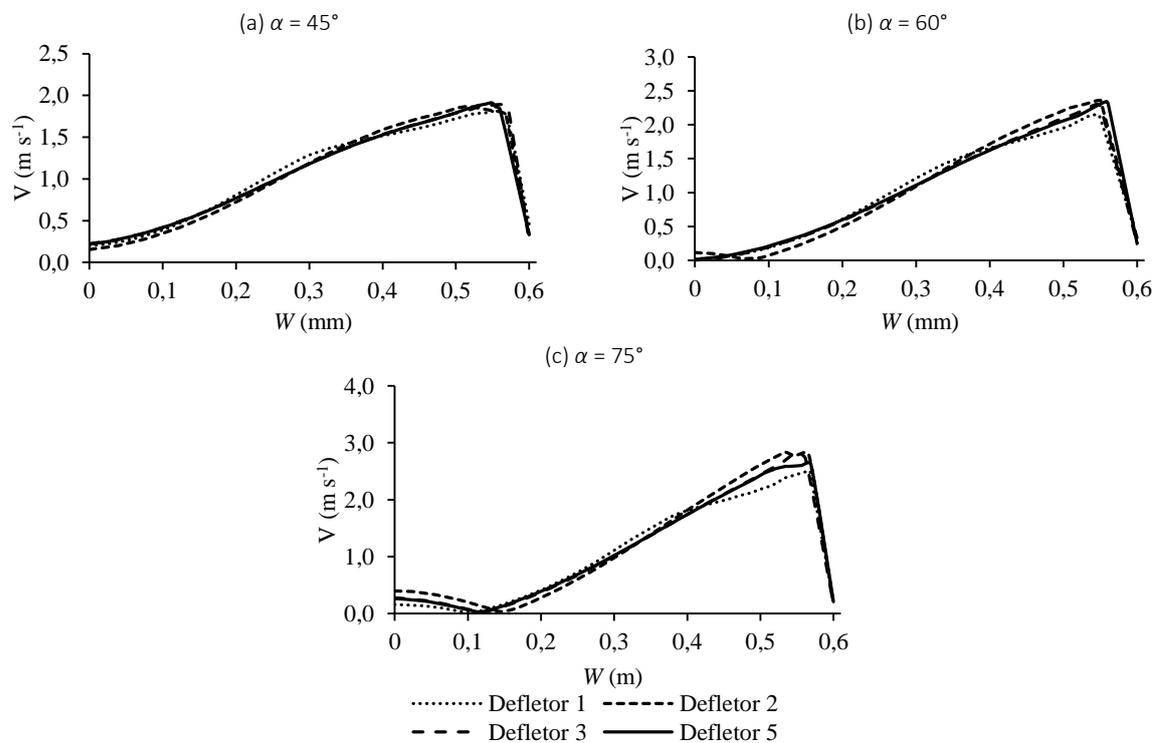


Figura 31. Perfil de velocidade de escoamento nos defletores 1, 2, 3, e 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,6 mm com ângulo do defletor de 45° (a), 60° (b), 75° (c)

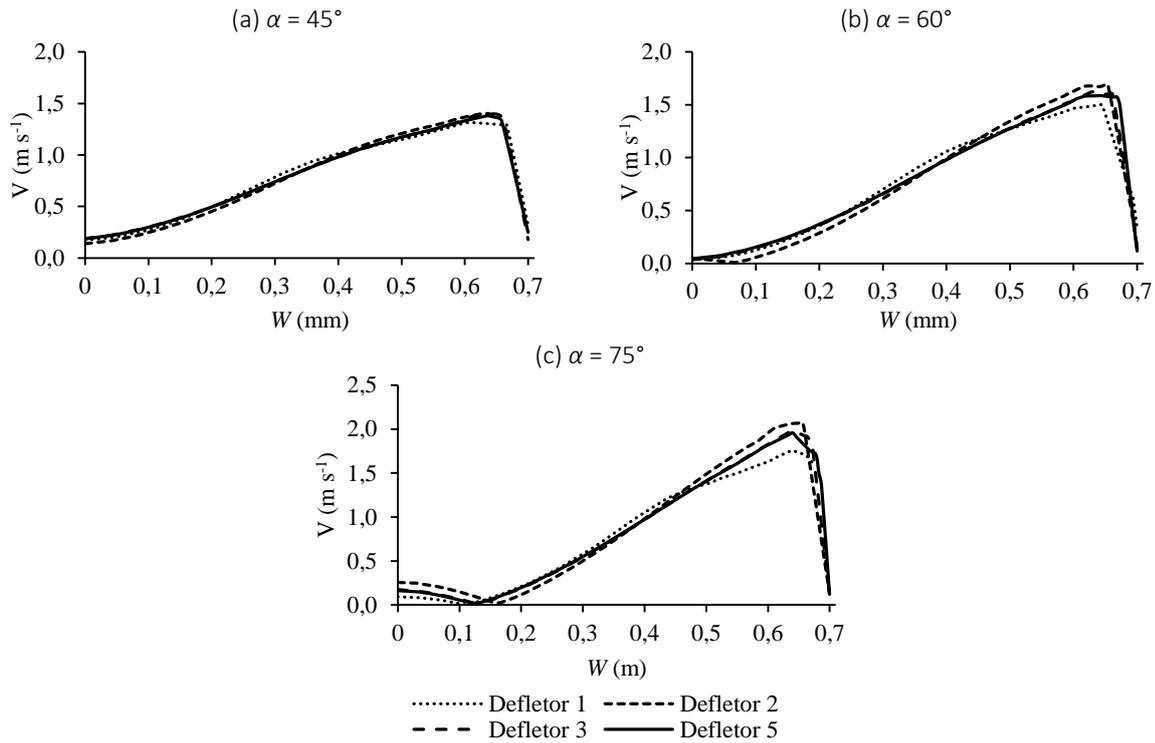


Figura 32. Perfil de velocidade de escoamento nos defletores 1, 2, 3, e 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,7 mm com ângulo do defletor de 45° (a), 60° (b), 75° (c)

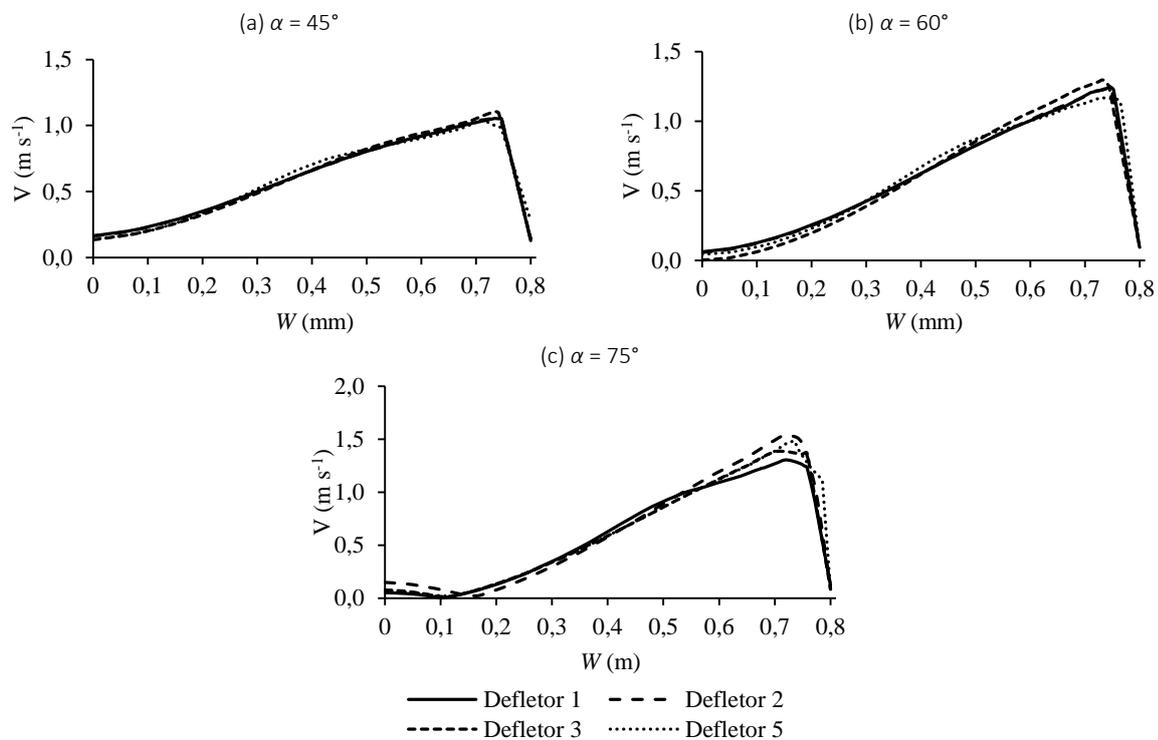


Figura 33. Perfil de velocidade de escoamento nos defletores 1, 2, 3, e 5 dos emissores EU com largura de canal de 0,8 mm com ângulo do defletor de 45° (a), 60° (b), 75° (c)

Para os emissores EV os perfis de velocidade de escoamento na seção transversal do canal nos defletores 1, 2, 3, e 5 (representados pelas linhas L1, L2, L3 e L5 na Figura 34), para os labirintos com largura de 0,7, 1,0 e 1,3 mm são apresentados nas Figura 35, Figura 36, e Figura 37 respectivamente.

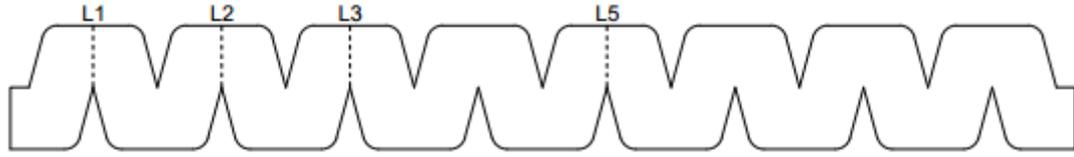


Figura 34. Indicação dos locais onde foram plotados os perfis de velocidade de escoamento nos emissores EV sendo defletor 1 (L1), defletor 2 (L2), defletor 3 (L3), e defletor 5 (L5)

Podemos observar que o perfil de velocidade muda de L1 para a L2 e de L2 para L3 indicando que as características do escoamento são alteradas de um defletor para outro no início do canal em praticamente todos os labirintos EV. No entanto, o perfil de velocidade no defletor 3 é muito similar ao defletor 5, sugerindo que o fluxo a partir do terceiro defletor é estável.

Em todas as geometrias estudadas no grupo EV a velocidade de escoamento na região do fluxo principal no primeiro defletor foi muito abaixo dos demais defletores. No entanto, os resultados demonstram que a altura do defletor não apresenta efeito significativo na máxima velocidade de escoamento do fluido no início do canal. Para as relações H/W de 1,0, 1,2, 1,4, e 1,6 foram observados valores de velocidade máxima de 1,70, 1,67, 1,62, e 1,66 m s^{-1} para a largura de canal de 0,7 mm, 1,19, 1,18, 1,16, e 1,20 m s^{-1} para largura de 1,0 mm, e 0,94, 0,91, 0,94, e 0,91 m s^{-1} para largura de 1,3 mm.

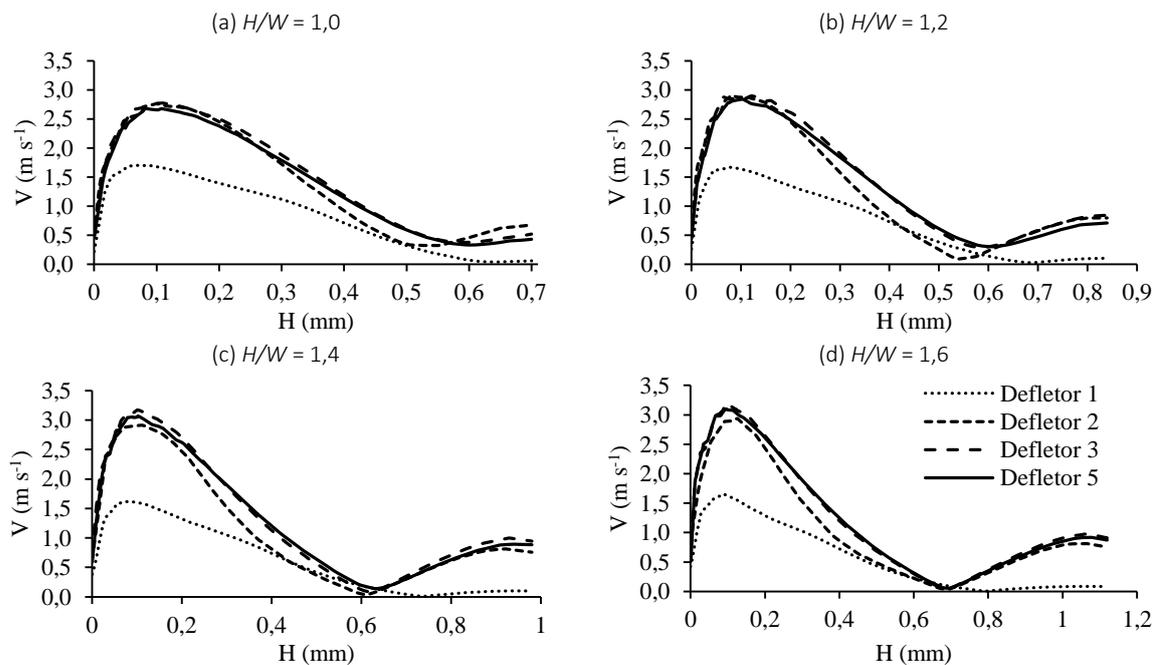


Figura 35. Perfil de velocidade de escoamento nas linhas do defletor 1, 2, 3, e 5 dos emissores EV com largura de canal de 0,7 mm com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)

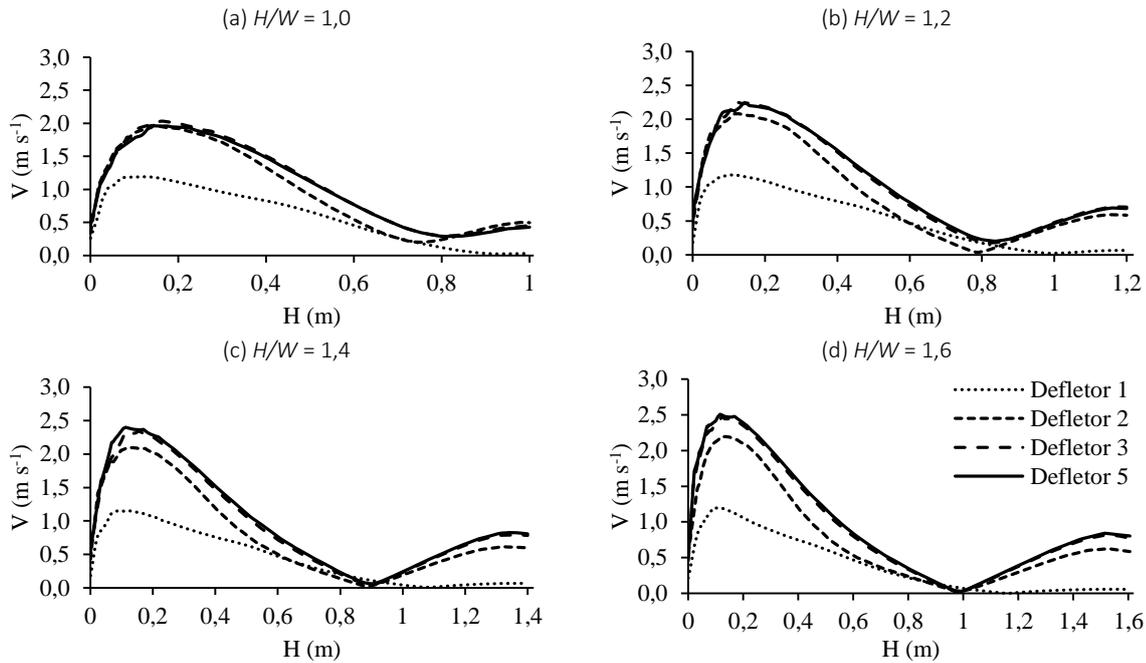


Figura 36. Perfil de velocidade de escoamento nas linhas do defletor 1, 2, 3, e 5 dos emissores EV com largura de canal de 1,0 mm com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)

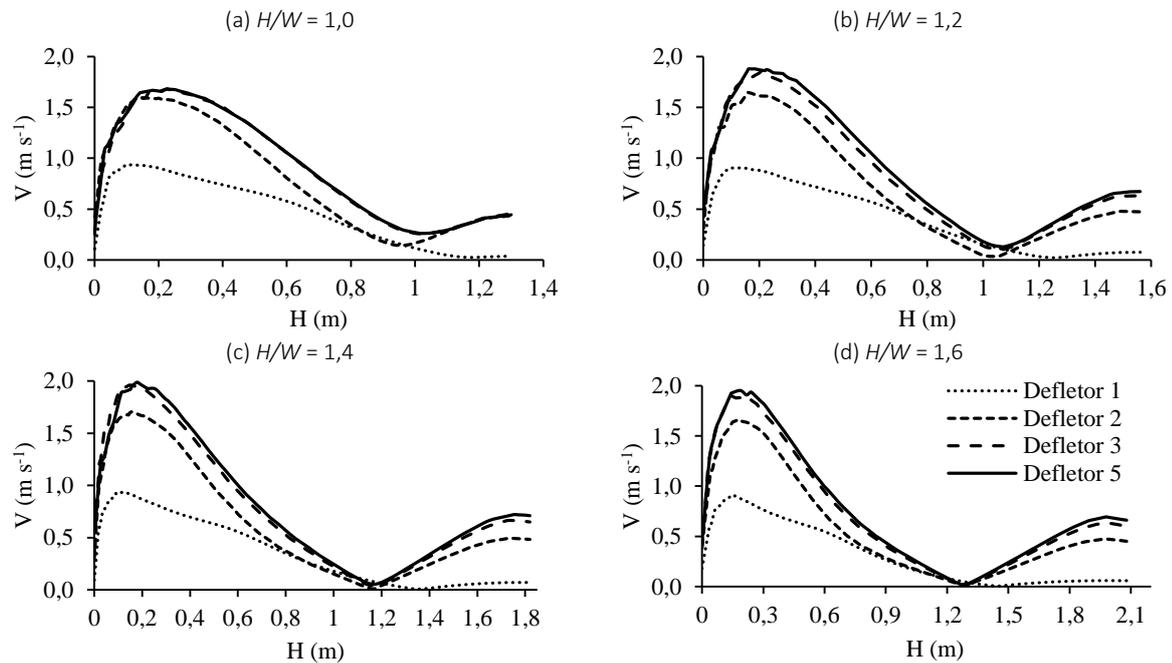


Figura 37. Perfil de velocidade de escoamento nas linhas do defletor 1, 2, 3, e 5 dos emissores EV com largura de canal de 1,3 mm com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)

A velocidade de escoamento na câmara de vórtice no primeiro defletor foi praticamente zero em todas as geometrias estudadas neste grupo. Contudo, o aumento da relação H/W implicou em maiores regiões com velocidade de escoamento próximo a zero no início do canal. Esta tendência pode ter efeitos negativos na resistência dos emissores à obstrução, pois podem favorecer o acúmulo de maior quantidade de partículas no início do canal para as relações H/W mais elevadas.

A presença de câmeras de vórtices nos emissores apresentou efeito significativo na estabilização do escoamento ao longo do labirinto. Comparando a evolução do fluxo nos emissores pertencentes aos grupos EU e EV, observamos que a estabilização ocorre de forma muito mais rápida nos emissores que apresentam escoamento uniforme, enquanto nos emissores com vórtices o perfil de velocidade no primeiro defletor apresenta valores menores e com características de escoamento muito distintas daquelas observadas nos defletores posteriores.

Tendências similares são apresentadas na literatura. Ait-Mouheb et al. (2019) observaram que na entrada do canal a velocidade e a energia cinética turbulenta são caracterizadas por valores baixos. Somente a partir do terceiro defletor o fluxo é hidráulicamente estável com uma zona de fluxo principal no centro do canal, caracterizada por valores de alta velocidade, e zonas de recirculação bem desenvolvidas.

4.2. Distribuição de pressão no labirinto

Para representar a variação da pressão estática ao longo dos defletores, obtidos a partir das simulações numéricas, foram escolhidos um labirinto de cada grupo de emissores estudados. No grupo EU foi escolhido a geometria com largura de canal de 0,5 mm e ângulo de defletor de 45°, e para o grupo EV foi escolhido o labirinto com largura de canal de 1,3 mm e relação H/W de 1,0, apresentados na Figura 38. A pressão diminui gradualmente entre a entrada e a saída do labirinto, devido à combinação entre as perdas distribuídas e localizadas de carga. Desta forma a pressão é máxima na entrada do labirinto e atinge o seu valor mínimo na saída atrás do último defletor, representada pela cor azul escuro. Os resultados na literatura em um canal de labirinto semelhante fornecem os mesmos campos de pressão (MOSTAFA; SULTAN, 2018).

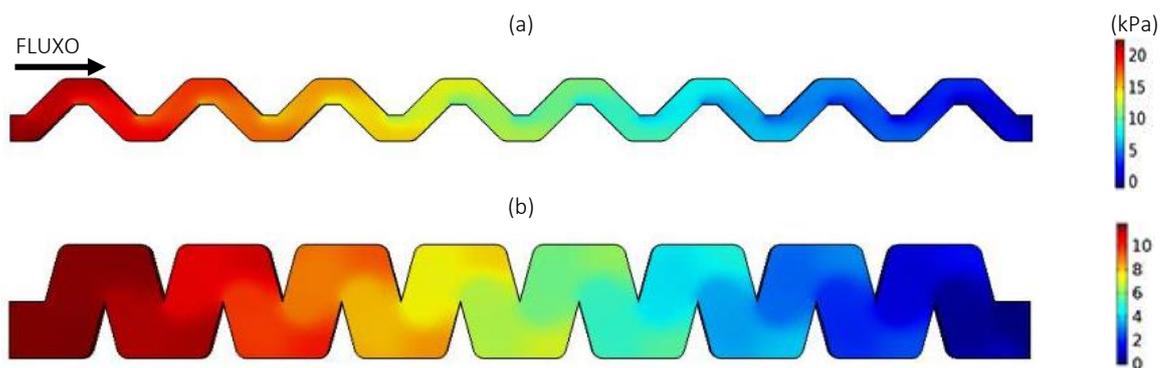


Figura 38. Evolução da pressão estática (kPa) obtidos a partir da simulação numérica de fluxo ao longo dos 8 defletores dos emissores EU (a) e EV (b)

A Tabela 8 apresenta para as duas geometrias escolhidas, a variação de pressão em cada uma das oito unidades defletoras que compõe o sólido utilizado na fase de simulação. Para o emissor EU a perda de carga que ocorre em cada unidade defletora é praticamente a mesma em todos os oito defletores. Já no emissor EV a primeira unidade defletora proporciona variação de pressão inferior aos demais. Este efeito possivelmente está relacionado com as condições de escoamento no início do canal. Em geral, nos labirintos do grupo EV o início do canal apresenta vórtices pouco desenvolvidos e fluxo principal com baixa

velocidade de escoamento, o que resulta em baixa perda de carga no primeiro defletor. Após a estabilização do fluxo, o comportamento do fluido é muito similar entre os defletores, e por isso a variação de pressão é praticamente a mesma.

Tabela 8. Perda de carga em cada unidade defletora obtida por simulação numérica para o emissor EU (largura de canal de 0,5 mm e ângulo de defletor de 45°), e emissor EV (largura de canal de 1,3 mm e relação H/W de 1,0)

Emissor	Defletor							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Variação de pressão (kPa)							
EU	2,68	2,58	2,61	2,61	2,62	2,61	2,62	2,69
EV	0,68	1,52	1,58	1,56	1,57	1,57	1,57	1,47

A distribuição de pressão na quinta unidade defletora dos labirintos EU (labirintos com largura de canal de 0,5 mm) e EV (labirintos com largura de canal de 1,3 mm), para a vazão de 1,4 L h⁻¹, obtida a partir da simulação numérica é apresentada nas Figura 39 e Figura 40, respectivamente. Em ambos os grupos de emissores as variações de pressão nos canais dos labirintos ocorrem principalmente nos cantos, localizados próximos aos picos dos defletores (identificado como I nas Figura 39a e Figura 40a), local que coincide com a região de escoamento do fluxo principal. Segundo Celik et al., 2011; Wei et al. (2006), quando as linhas de escoamento atingem estes cantos, ocorrem mudanças na direção do fluxo resultando em uma grande perda localizada de carga. Esta perda de carga que ocorre nos cantos é apontada como a principal causa da variação de pressão ao longo do labirinto, e determina o grau de dissipação da energia hidráulica e o desempenho do emissor.

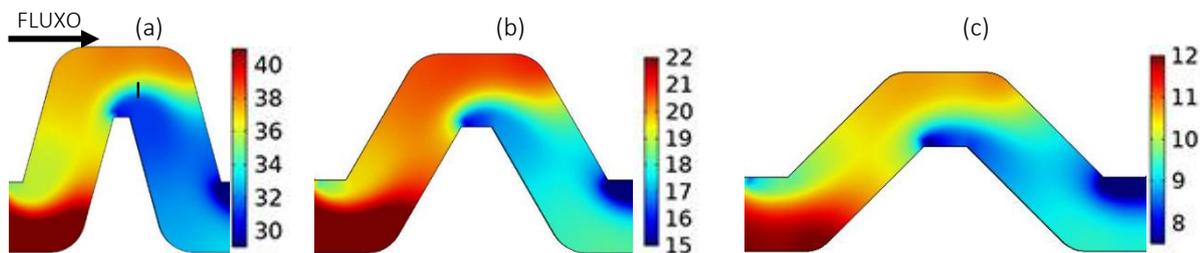


Figura 39. Distribuição de pressão (kPa) no quinto defletor dos emissores EU com W de 0,5 mm com ângulo de 45° (a), 60° (b) e 45° (c)

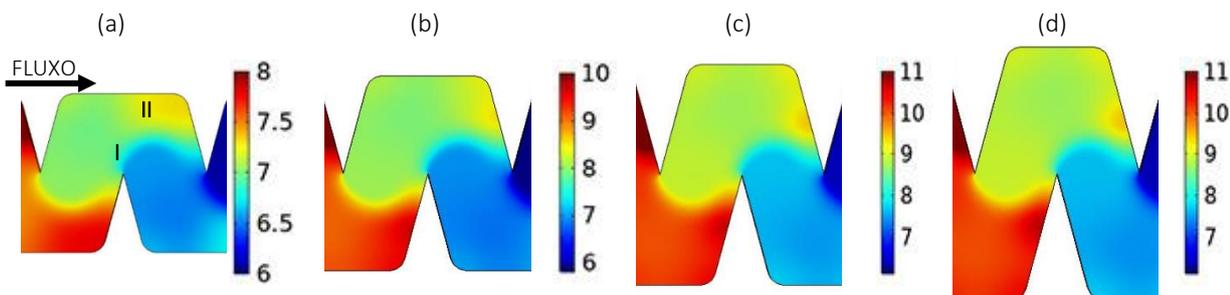


Figura 40. Distribuição de pressão (kPa) no quinto defletor dos emissores EV com W de 1,3 mm e relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c) e 1,6 (d)

Para os emissores EV foi identificado um outro ponto que apresenta gradiente de pressão (identificado como II na Figura 40a). Esta região coincide com o local de impacto do fluido que escoar em elevada velocidade no fluxo principal com a parede do canal. Durante o impacto parte da energia cinética é convertida em energia de pressão, posteriormente dissipada.

4.3. Efeito da estrutura do canal no comprimento do labirinto

A Tabela 9 apresenta as características geométricas dos protótipos de emissores do grupo EU. Conforme já discutido, o coeficiente de perda total de carga de cada defletor (φ) foi obtido a partir da simulação numérica de um segmento de labirinto contendo apenas 8 defletores. Na sequência, o número de defletores (N) e o comprimento do labirinto (L) foram calculados utilizando a equação (12) e o comprimento correspondente a cada defletor. A Tabela 10 apresenta esquematicamente os labirintos desenvolvidos para o grupo EU.

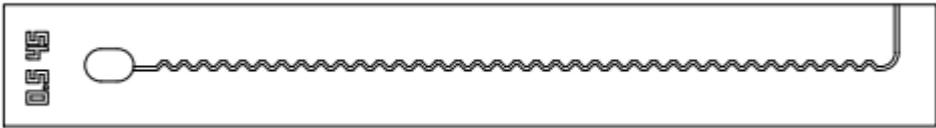
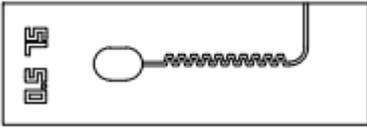
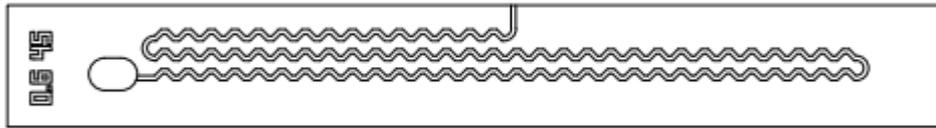
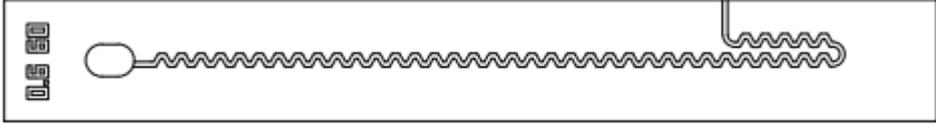
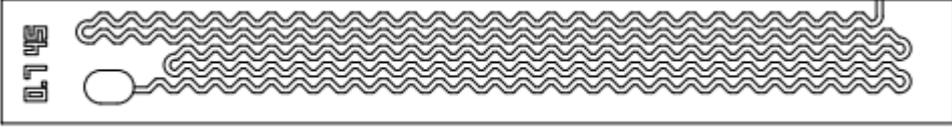
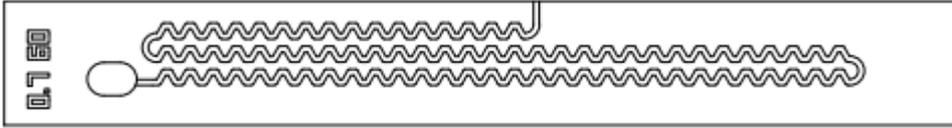
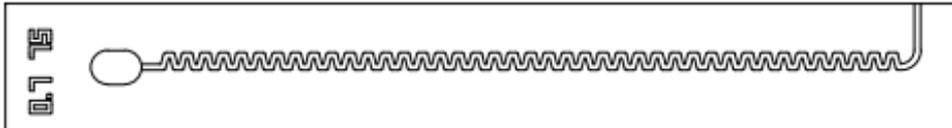
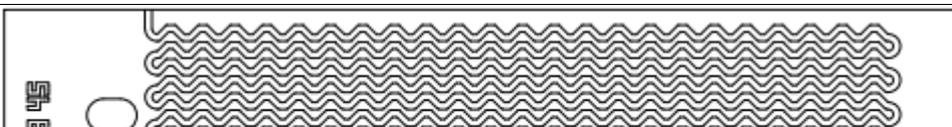
Tabela 9. Características geométricas dos protótipos do grupo EU e coeficiente de perda de carga no defletor dos labirintos (φ)

Emissor	W (mm)	D (mm)	A (mm ²)	H (mm)	α (°)	φ	N	L (mm)
EU 1	0,5	0,5	0,25	0,71	45	2,23	37	89,32
EU 2	0,5	0,5	0,25	0,87	60	4,42	18	36,00
EU 3	0,5	0,5	0,25	0,97	75	8,04	10	15,18
EU 4	0,6	0,6	0,36	0,85	45	2,25	75	217,28
EU 5	0,6	0,6	0,36	1,04	60	4,24	40	96,00
EU 6	0,6	0,6	0,36	1,16	75	7,80	22	40,07
EU 7	0,7	0,7	0,49	0,99	45	2,28	136	459,68
EU 8	0,7	0,7	0,49	1,21	60	4,10	76	221,80
EU 9	0,7	0,7	0,49	1,35	75	7,55	41	87,11
EU 10	0,8	0,8	0,64	1,13	45	2,31	230	888,42
EU 11	0,8	0,8	0,64	1,39	60	3,99	133	425,60
EU 12	0,8	0,8	0,64	1,55	75	7,28	73	177,26

Mantendo-se dado ângulo de defletor (α), o comprimento do labirinto necessário para atingir a vazão de projeto aumentou conforme ampliou-se a área da seção de escoamento (A). A vazão do emissor é dada pelo produto da área da seção de escoamento com a velocidade média de escoamento. Se a seção do canal do labirinto aumenta, para que se obtenha a vazão estabelecida no projeto é necessário reduzir a velocidade de escoamento, o que pode ser obtido expandindo número de unidades defletoras (WEI et al., 2007).

O aumento no número de defletores, e consequentemente do comprimento do canal, tem como efeito a intensificação da perda de carga ao longo do labirinto, reduzindo a velocidade de escoamento e ajustando a vazão para o valor de projeto. Pela equação (12), observamos que o número de defletores é diretamente proporcional a variação de pressão, ao quadrado da área da seção de escoamento, e inversamente proporcional ao quadrado da vazão do emissor. Portanto, uma das formas de se controlar a vazão de um emissor é por meio da alteração do número de defletores que compõem o labirinto (WEI et al., 2007).

Tabela 10. Representação esquemática dos protótipos de emissores EU

W (mm)	α (°)	Representação dos protótipos pertencentes ao grupo EU
0,5	45	
	60	
	75	
0,6	45	
	60	
	75	
0,7	45	
	60	
	75	
0,8	45	
	60	
	75	

Em relação ao ângulo dos defletores, os protótipos com defletores em 45° proporcionaram os maiores comprimentos de labirintos para canais de mesma seção. Incrementos no ângulo dos defletores resultaram em reduções significativas no número de defletores e no comprimento do labirinto. Com acréscimos de 15°, obteve-se em média redução de 57% no comprimento do labirinto, e ao aumentar-se 30°, a redução foi de aproximadamente 81%. Observou-se ainda que o coeficiente de perda total de carga de cada defletor (φ) foi pouco influenciado por mudanças na seção quadrada de escoamento dos emissores EU, porém φ apresentou forte sensibilidade a variações no ângulo do defletor. Com acréscimos de 15° em α , obteve-se em média aumento de 85% em φ , e ao aumentar-se o ângulo em 30°, o aumento de φ foi da ordem de 238%.

Zhang, Zhao e Lu (2013) afirmam que o ângulo dos defletores é um dos parâmetros construtivos que mais afetam o coeficiente de perda de carga dos labirintos de formato trapezoidal. O ângulo do defletor exerce impacto nas mudanças de direção do fluxo, que provocam alterações abruptas nas direções do escoamento e ocasionam variações na componente de perda localizada de carga. Pelas características de escoamento nos labirintos foi possível observar que nos emissores com ângulo de defletores mais inclinados as mudanças na direção do fluxo são mais acentuadas, o que causa maior perda de carga. Observou-se também que a magnitude da velocidade de escoamento na região do fluxo principal nos labirintos mais inclinados é superior aos outros defletores, o que pode elevar a perda de carga no labirinto. Portanto, defletores mais inclinados, proporcionam maior perda de carga em cada defletor e permitem o projeto de labirintos mais curtos (LI et al., 2006a; ZHANG; ZHAO; LU, 2013).

A Tabela 11 apresenta as características geométricas dos protótipos de emissores do grupo EV, sendo que a metodologia para determinação de φ , N e L foi a mesma já descrita para o grupo de emissores EU. A Tabela 12 apresenta esquematicamente os labirintos desenvolvidos para o grupo EV.

Tabela 11. Características geométricas dos protótipos do grupo EV e coeficiente de perda de carga no defletor dos labirintos (φ)

Emissor	W (mm)	H/W	A (mm ²)	φ	N	L (mm)
EV1	0,7	1,0	0,49	17,71	23	33,33
EV2	0,7	1,2	0,49	21,21	19	27,54
EV3	0,7	1,4	0,49	24,43	17	24,64
EV4	0,7	1,6	0,49	25,32	16	23,19
EV5	1,0	1,0	1,00	18,82	44	91,10
EV6	1,0	1,2	1,00	24,58	34	70,40
EV7	1,0	1,4	1,00	28,05	30	62,00
EV8	1,0	1,6	1,00	30,09	28	58,00
EV9	1,3	1,0	1,69	20,97	67	177,65
EV10	1,3	1,2	1,69	28,84	49	131,89
EV11	1,3	1,4	1,69	30,14	47	126,51
EV12	1,3	1,6	1,69	31,84	45	118,43

Assim como os emissores do grupo EU, o aumento seção de escoamento também resultou na ampliação do comprimento do labirinto. Por outro lado, incrementos na razão entre a altura do defletor (H) e a largura do labirinto (W) resultaram em aumento no coeficiente de perda de carga φ e em redução do comprimento de labirintos de dada seção. Os labirintos com os menores comprimentos foram obtidos para os emissores cujo a razão H/W foi de 1,6, indicando que esses protótipos apresentaram melhor desempenho

hidráulico comparado aos demais, pois são capazes de proporcionar maior perda de carga para a dada seção de escoamento.

Tabela 12. Representação esquemática dos protótipos de emissores EV

W (mm)	H/W	Representação dos protótipos pertencentes ao grupo EV
0,7	1,0	
0,7	1,2	
0,7	1,4	
0,7	1,6	
1,0	1,0	
1,0	1,2	
1,0	1,4	
1,0	1,6	
1,3	1,0	
1,3	1,2	
1,3	1,4	
1,3	1,6	

Analisando o efeito do aumento da razão H/W na redução do comprimento do labirinto (Figura 41), observa-se reduções mais significativas quando a diferença entre os comprimentos é expressa baseada nos emissores com razão H/W de 1,0. As variações foram em média 22, 29, e 33% quando H/W passou de 1,0 para 1,2, 1,4 e 1,6, respectivamente. Já quando a diferença foi analisada tomando como base a razão H/W de 1,2 as reduções percentuais no comprimento foram menores, variando em média 9 e 15% quando os emissores foram desenvolvidos com razão H/W de 1,4 e 1,6, respectivamente. Para variações na razão H/W de 1,4 para 1,6 obteve-se redução média de 6%.

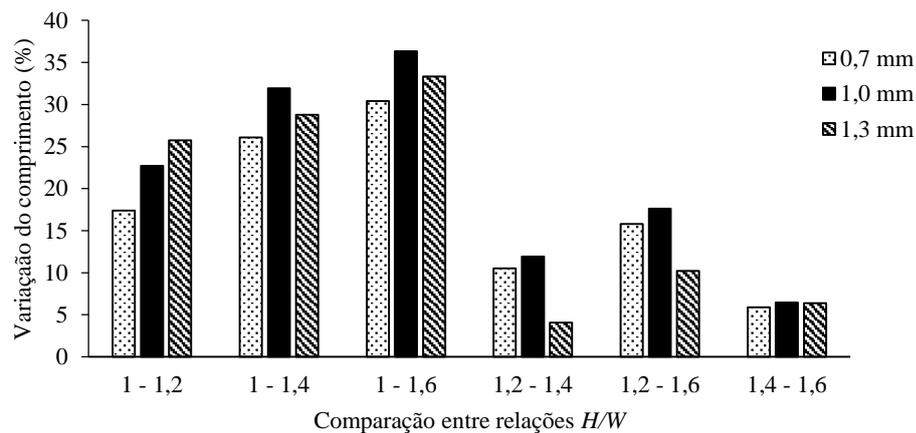


Figura 41. Efeito do aumento da razão H/W na redução do comprimento do labirinto para as larguras (W) estudadas no grupo de emissores EV

O aumento da relação H/W implica em vórtices mais intensos e por isso são capazes de provocar maior perda de carga por unidade defletora. O aumento da altura dos defletores também elevou a velocidade máxima de escoamento na região do fluxo principal e na região periférica dos vórtices, o que pode ter contribuído com o aumento da perda de carga, tornando os emissores mais eficientes do ponto de vista hidráulico, permitindo a construção de labirintos de menor comprimento.

Ao compararmos as informações apresentadas nas Tabela 9 e Tabela 10, para larguras de canais similares, observamos que os protótipos do grupo EV apresentam comprimentos de labirintos menores do que aqueles do grupo EU. Dessa forma, podemos afirmar que emissores com características geométricas que favorecem o desenvolvimento de vórtices mais intensos tendem a ser mais eficientes em termos de desempenho hidráulico uma vez que a presença de vórtices nos canais dos labirintos auxilia na dissipação de energia (WEI et al., 2006). Esses resultados estão de acordo com Feng et al. (2018), que avaliando a otimização de labirintos de formato trapezoidal, observaram que ao eliminar regiões que permitem a formação de vórtices, a vazão dos emissores aumentaram entre duas a cinco vezes. Os autores relatam ainda que para manter a vazão próxima do emissor com características construtivas originais, seria necessário aumentar o número de unidades defletoras dos labirintos modificados, aumentando o comprimento do labirinto, o que resultaria em aumento no custo de fabricação. Portanto, evidencia-se que vórtices são mecanismos importantes para a dissipação de energia e controle de vazão de labirintos de emissores.

4.4. Efeito das características construtivas na relação vazão - pressão

4.4.1. Emissores com escoamento uniforme

As Figura 42, Figura 43, Figura 44 e Figura 45 mostram as curvas vazão-pressão, obtidas experimentalmente e por meio da simulação numérica para todos os protótipos EU.

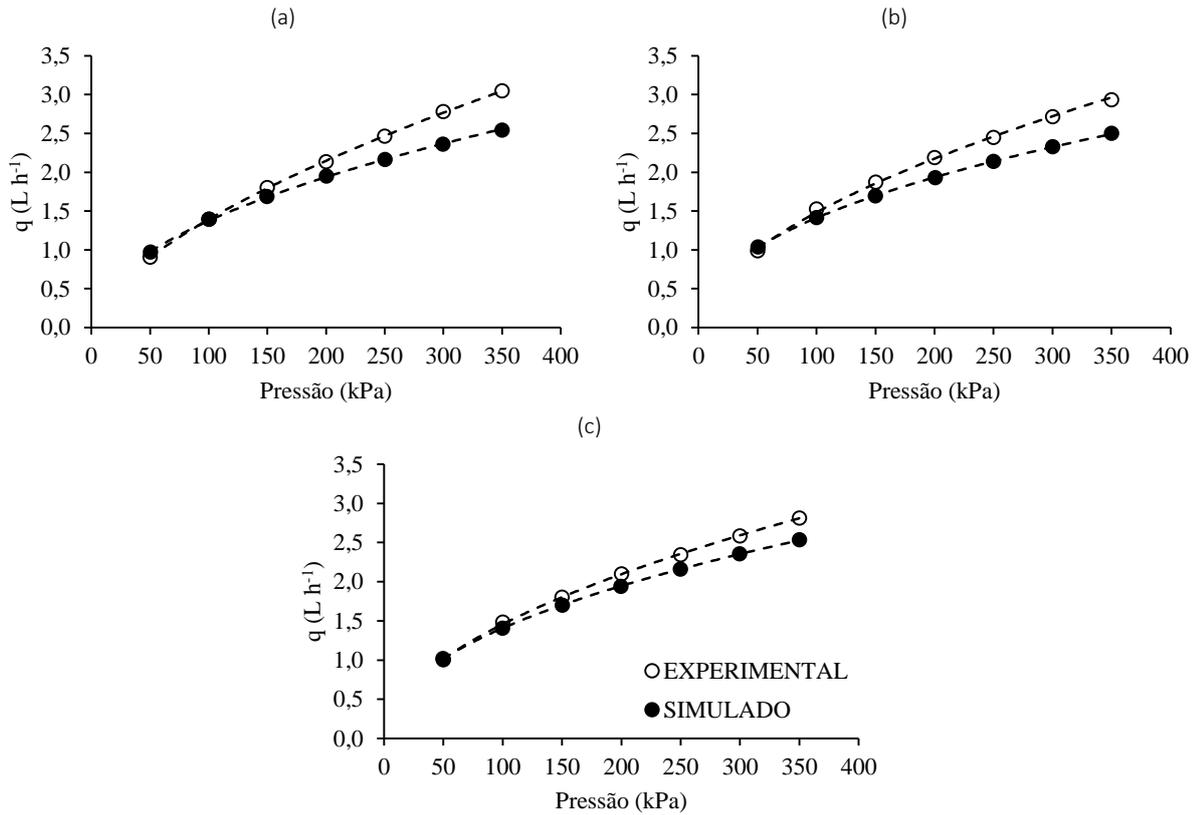


Figura 42. Curva vazão-pressão dos emissores de canal com largura de 0,5 mm e com ângulo de 45 (a), 60 (b), e 75 (c)

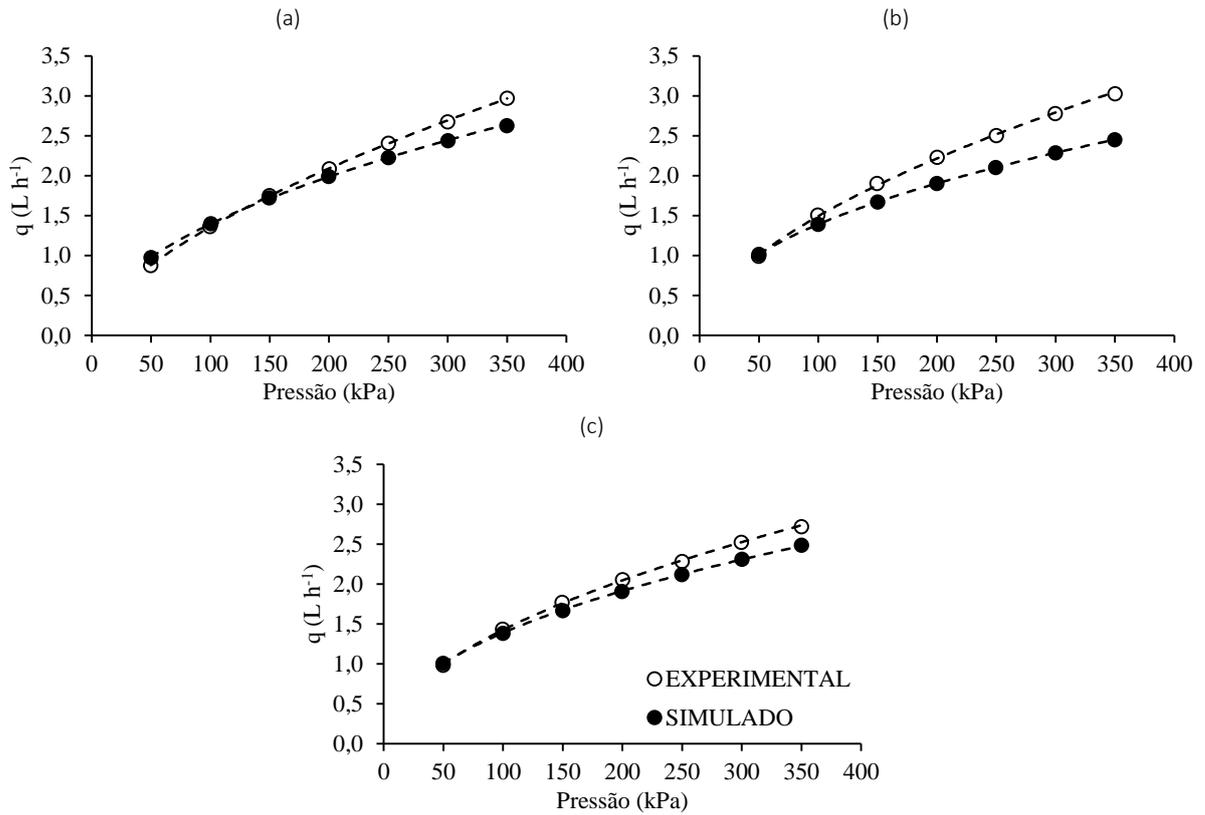


Figura 43. Curva vazão-pressão dos emissores de canal com largura de 0,6 mm com ângulo de 45 (a), 60 (b), e 75 (c)

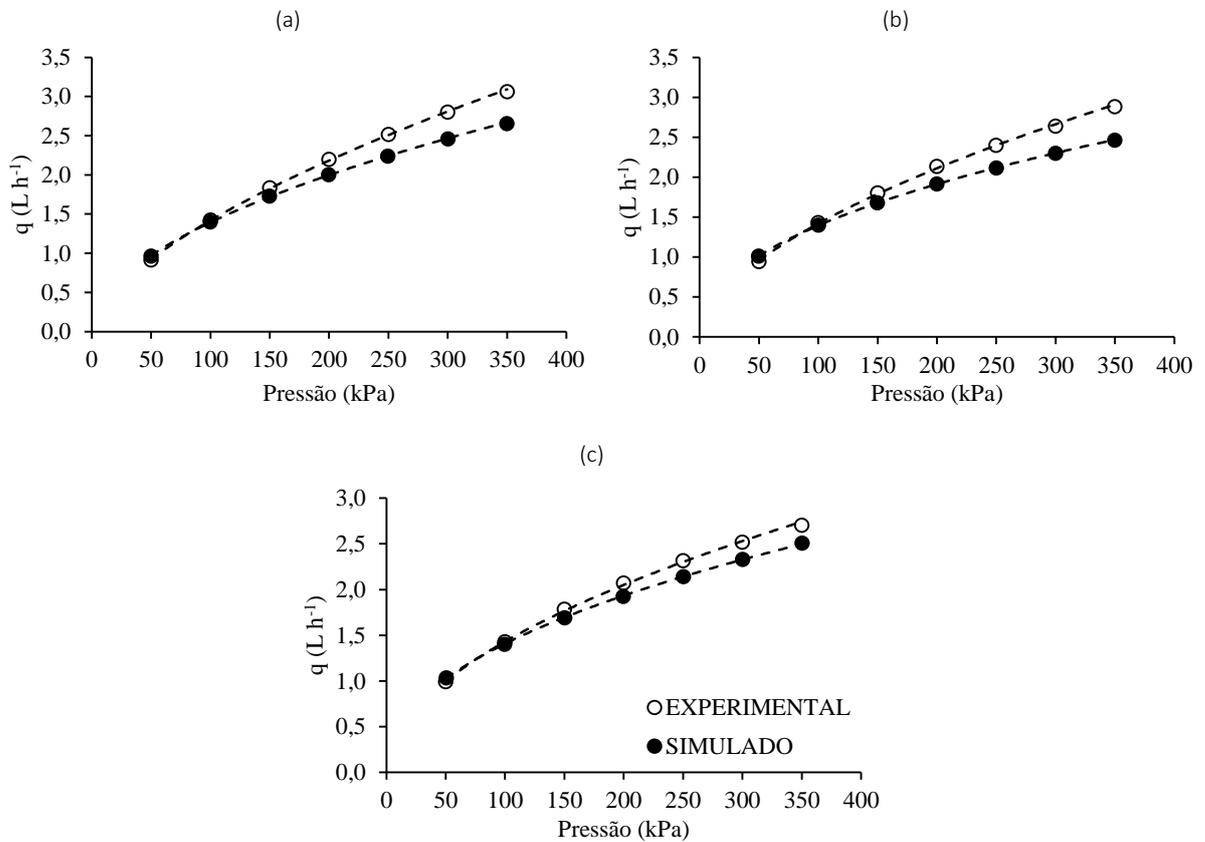


Figura 44. Curva vazão-pressão dos emissores de canal com largura de 0,7 mm e com ângulo de 45 (a), 60 (b), e 75 (c)

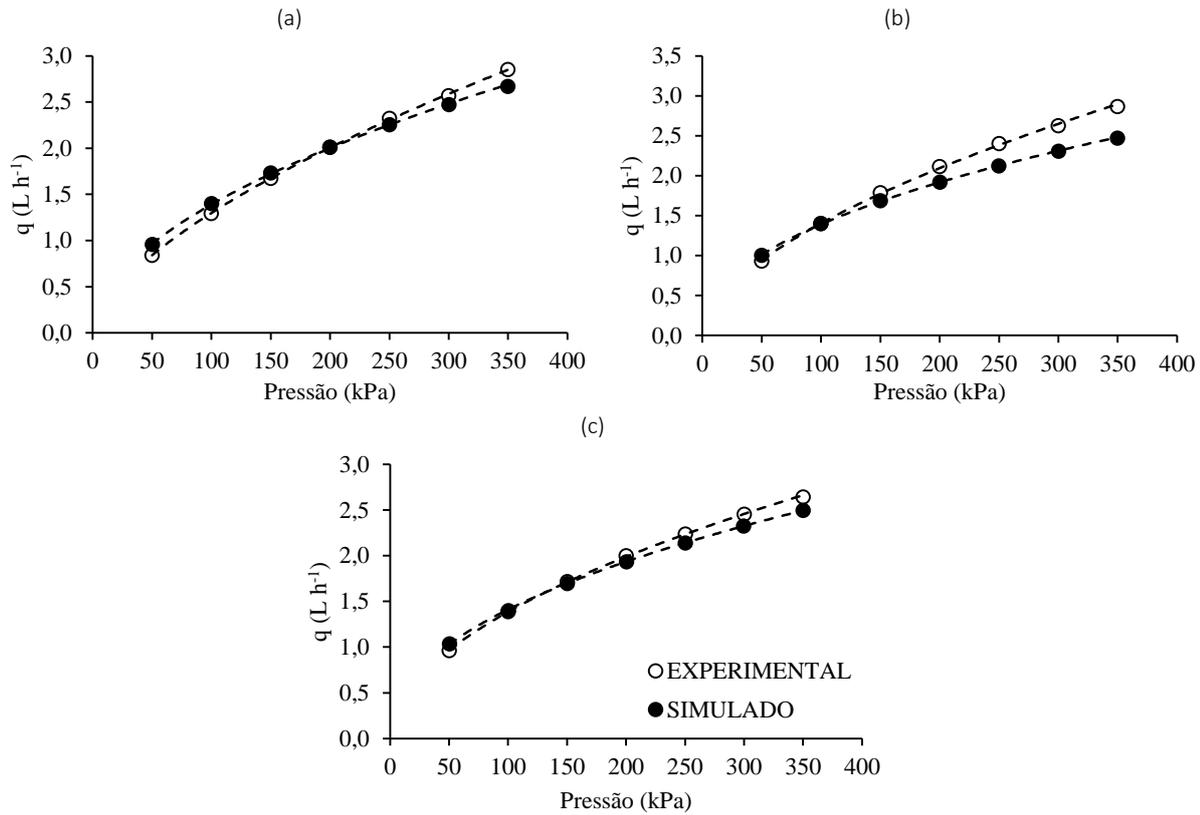


Figura 45. Curva vazão-pressão dos emissores de canal com largura de 0,8 mm e com ângulo de 45 (a), 60 (b), e 75 (c)

As tendências das curvas vazão-pressão obtidas experimentalmente são ligeiramente distintas das obtidas pela simulação numérica. Em geral, as diferenças entre os valores de vazão são menores para as pressões de operação mais baixas, aumentando gradualmente a medida que a pressão de operação é elevada (Tabela 13).

Tabela 13. Erro relativo entre os valores de vazão experimentais e simulados para as diferentes pressões avaliadas

W (mm)	a (°)	Pressão (kPa)						
		50	100	150	200	250	300	350
0,5	45	7,32	0,18	6,45	8,65	12,18	15,12	16,56
	60	4,69	7,33	9,36	11,80	12,56	14,30	14,67
	75	1,30	5,45	5,76	7,51	7,88	8,89	9,76
0,6	45	11,45	2,59	1,69	4,50	7,46	8,85	11,53
	60	2,56	7,60	12,15	14,75	16,01	17,77	18,94
	75	2,63	3,58	5,81	7,25	7,26	8,36	8,54
0,7	45	5,36	1,68	5,80	8,92	10,96	12,15	13,34
	60	7,31	2,29	6,81	10,27	11,78	12,93	14,55
	75	4,22	2,01	5,28	6,94	7,55	7,42	7,33
0,8	45	13,82	8,31	3,43	0,14	2,96	3,73	6,42
	60	7,78	0,38	5,63	9,17	11,62	12,10	13,72
	75	7,89	0,86	1,13	3,31	4,26	5,25	5,48

Com relação ao ângulo dos defletores, observou-se que para protótipos construídos com ângulo de 75° os erros relativos entre as curvas vazão-pressão simulados e experimentais são menores, ou seja, as duas curvas são mais próximas quando comparado aos protótipos equipados com demais ângulos estudados

A Tabela 14 apresenta o expoente de fluxo (x) e o coeficiente de proporcionalidade (k) da equação característica, os valores de vazão (q), e os erros relativos (Er) entre os expoentes de fluxo obtidos experimentalmente e simulados para os protótipos com escoamento uniforme.

Tabela 14. Parâmetros da equação característica do emissor, vazão determinada na pressão de 100 kPa e erro relativo (Er) entre valores de expoente de fluxo obtidos experimentalmente e pela simulação numérica para os emissores EU

W (mm)	a (°)	EXPERIMENTAL			SIMULADO			Er de x (%)
		k	x	q (L h ⁻¹)*	k	x	q (L h ⁻¹)*	
0,5	45	0,078	0,625	1,39	0,140	0,496	1,39	20,64
	60	0,116	0,553	1,52	0,174	0,454	1,41	17,90
	75	0,131	0,524	1,49	0,164	0,467	1,40	10,88
0,6	45	0,077	0,623	1,36	0,133	0,510	1,39	18,14
	60	0,109	0,569	1,51	0,174	0,452	1,39	20,56
	75	0,131	0,519	1,44	0,166	0,462	1,38	10,98
0,7	45	0,081	0,622	1,42	0,127	0,520	1,40	16,40
	60	0,102	0,573	1,43	0,170	0,457	1,40	20,24
	75	0,131	0,519	1,43	0,171	0,458	1,40	11,75
0,8	45	0,072	0,628	1,29	0,123	0,527	1,40	16,08
	60	0,098	0,578	1,41	0,166	0,462	1,40	20,07
	75	0,126	0,521	1,39	0,174	0,455	1,40	12,67

*Vazão obtida para a pressão de operação de 100 kPa

Analisando os expoentes de fluxo obtidos experimentalmente para os emissores do grupo EU, foram observados valores na faixa de 0,5 e 0,7, enquadrando-se como emissores com fluxo parcialmente turbulento (KELLER; KARMELI, 1974). Os menores expoentes foram obtidos para os labirintos com defletores inclinados em 75°, com valores entre 0,519 a 0,524. No entanto, reduções no ângulo dos defletores promoveram aumentos do valor do expoente, variando entre 0,553 a 0,578 para o ângulo de 60° e 0,622 a 0,628 para o ângulo de 45°. Os emissores com defletores inclinados em 75° ofereceram o melhor desempenho hidráulico, pois apresentaram expoente de fluxo próximo a 0,5 e condições de escoamento tendendo a emissores de fluxo turbulento. Por outro lado, emissores equipados com defletores com ângulo de 45° proporcionam expoente de fluxo superiores a 0,6. Do ponto de vista hidráulico emissores com expoentes elevados não são desejáveis, uma vez que a vazão dos emissores torna-se mais sensível a variação de pressão e de temperatura da água (RODRÍGUEZ-SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999), sendo preferível emissores que apresentam expoente de fluxo próximo ou inferior a 0,5.

A mesma tendência foi observada por (YU et al., 2018c) que identificaram reduções no valor do expoente de 0,49 para 0,47 ao aumentar o ângulo do defletor de 45 para 75°. Os menores valores de expoente de fluxo para os ângulos mais inclinados estão relacionados com as características de escoamento proporcionado por estas inclinações. Defletores com ângulos mais elevados modificam as propriedades do fluxo e elevam a intensidade de turbulência durante a movimentação do fluido, fazendo com que a sensibilidade das variações na vazão diminua quando a pressão é alterada e consequentemente reduz o expoente de fluxo do emissor (YU et al., 2018c).

Para os dados obtidos por meio das simulações numéricas os expoentes de fluxo dos labirintos equipados com defletores com ângulo de 45° também apresentaram os maiores valores, variando entre 0,496 e 0,527. No entanto, para os demais ângulos estudados foram observados expoentes abaixo de 0,5 e com

valores muito semelhantes variando entre 0,452 a 0,462, para os ângulos de 60°, e 0,455 a 0,467, para os ângulos de 75°.

Para os 12 protótipos avaliados os valores do expoente de fluxo obtidos experimentalmente foram superiores aos simulados. Os erros relativos entre os dois valores de expoentes foram menores para os protótipos com ângulo do defletor de 75°, com variação média de 12%, enquanto os protótipos equipados com defletores inclinados em 45° e 60° apresentaram variações médias de 18% e 20% respectivamente. Observamos que as simulações apresentaram melhor estimativa da relação entre a vazão-pressão de operação para os protótipos equipados com defletores inclinados em 75°. Como o modelo numérico *standard k-ε* é indicado para fluxo totalmente turbulento, para os ângulos de menor inclinação é possível que a simulação de fluxo nos labirintos superestime a turbulência, elevando a estimativa da perda de carga nas pressões maiores, e como consequência, subestimando o valor dos expoentes.

4.4.2. Emissores com vórtice no canal (EV)

As curvas vazão-pressão obtidas experimentalmente e por meio de simulação numérica para os emissores que proporcionam a formação de vórtices no interior do canal são apresentadas nas Figura 46, Figura 47 e Figura 48.

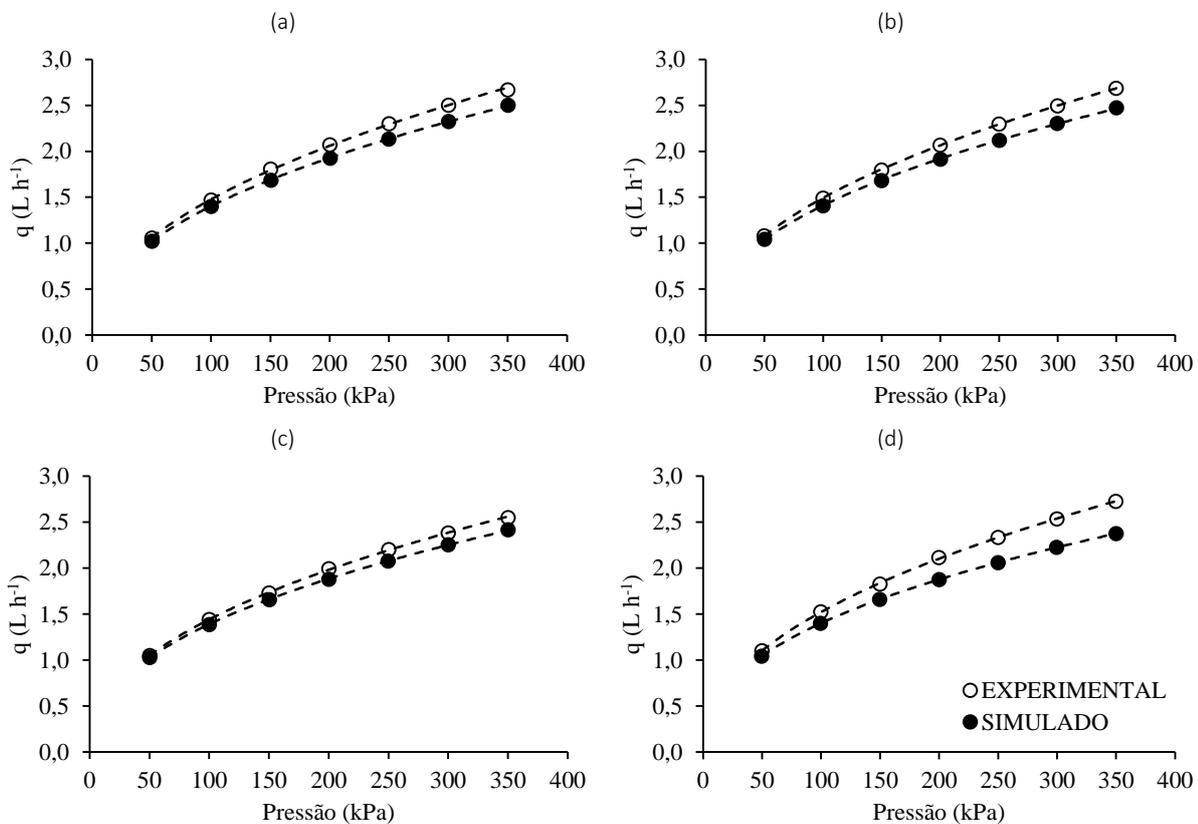


Figura 46. Curva vazão-pressão dos emissores EV de canal com largura de 0,7 mm e com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)

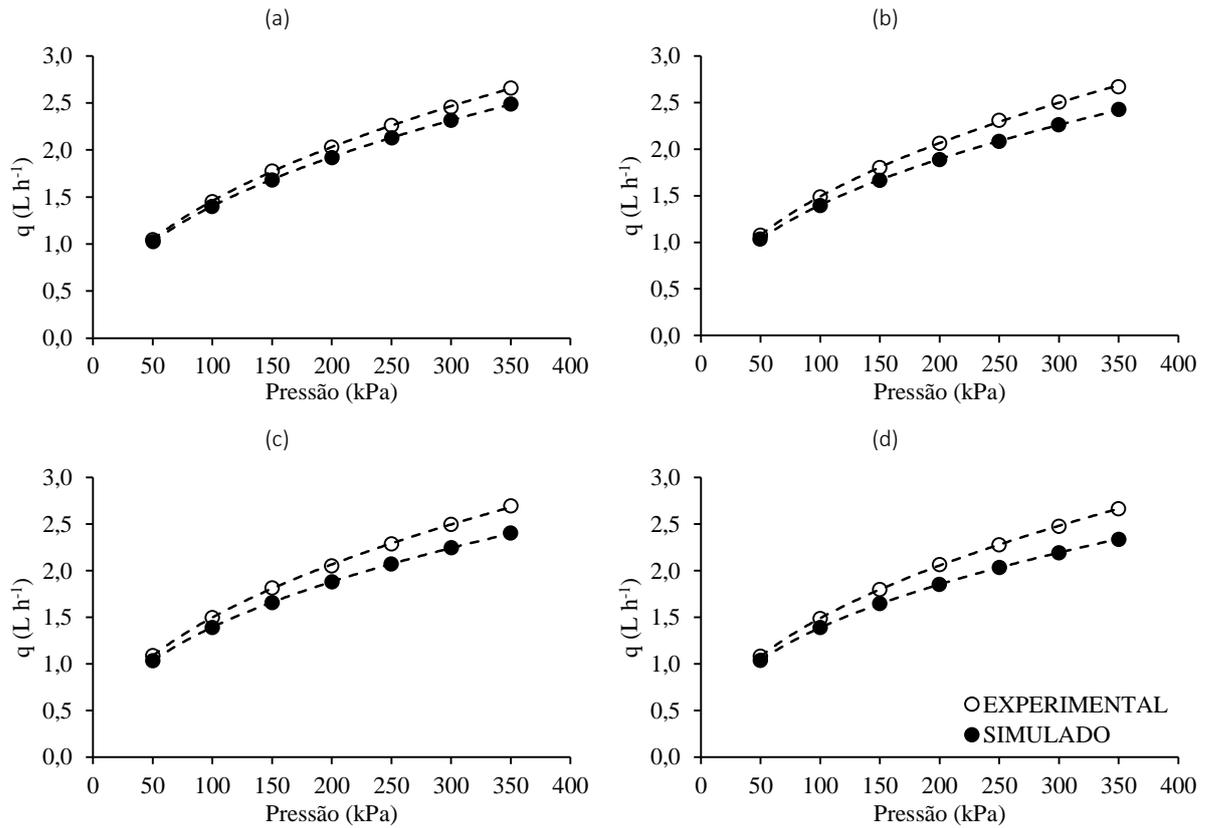


Figura 47. Curva vazão-pressão dos emissores EV com largura de canal de 1,0 mm e com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)

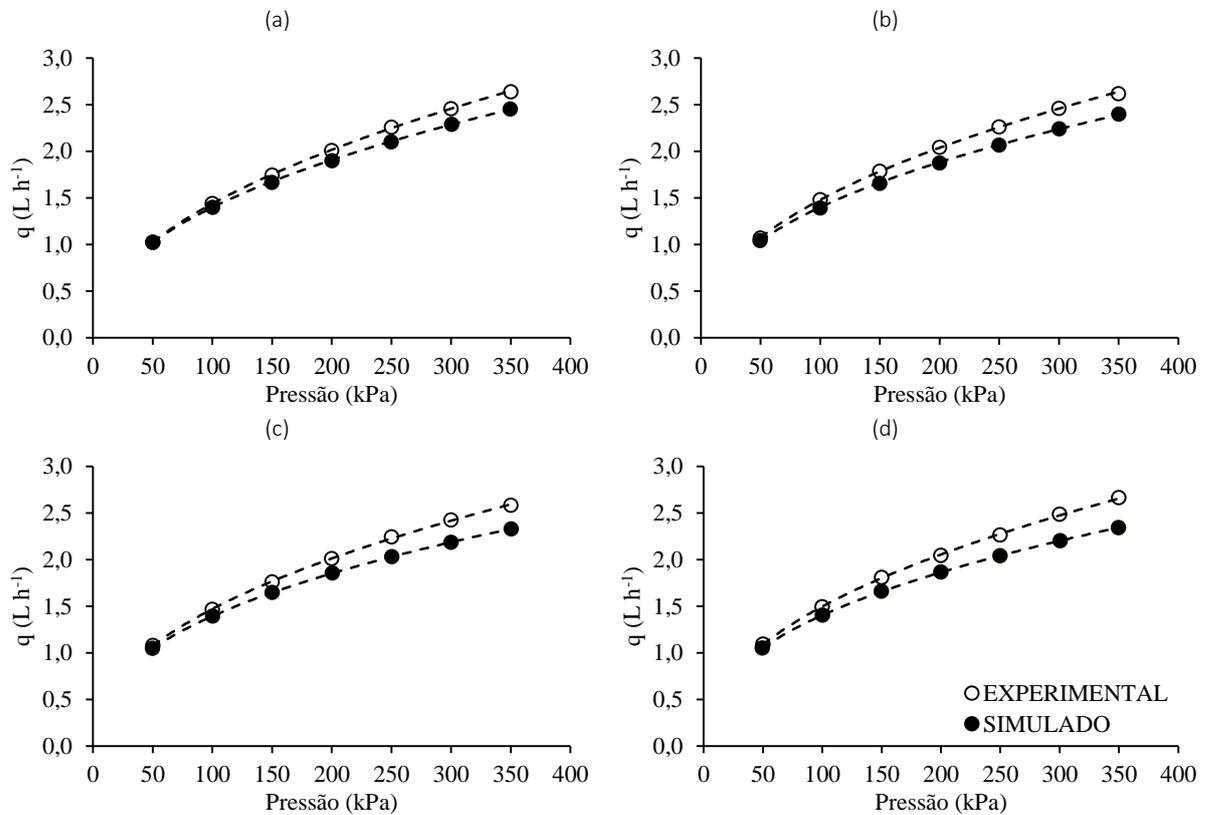


Figura 48. Curva vazão-pressão dos emissores EV com largura de canal de 1,3 mm e com relação H/W de 1,0 (a), 1,2 (b), 1,4 (c), e 1,6 (d)

Os emissores com características geométricas que permitem a formação de vórtices também apresentaram diferenças entre os valores de vazões obtidos experimentalmente e os obtidos pela simulação numérica. Pela Tabela 15 observa-se que as menores diferenças ocorreram para as pressões de operação mais baixas, aumentando gradualmente a medida que a pressão de operação foi elevada.

Tabela 15. Erro relativo entre os valores de vazão experimentais e simulados nas diferentes pressões avaliadas para os emissores EV

W (mm)	α (°)	Pressão (mca)						
		50	100	150	200	250	300	350
0,7	1	3,16	4,84	6,73	7,01	7,20	7,01	6,33
	1,2	3,44	5,79	6,43	7,30	7,66	7,77	7,99
	1,4	1,78	3,97	4,35	5,67	5,80	5,41	5,13
	1,6	5,30	8,17	9,18	11,21	11,74	12,22	12,85
1,0	1	1,94	3,59	5,34	5,41	5,82	5,66	6,39
	1,2	4,01	6,27	7,66	8,47	9,70	9,66	9,08
	1,4	4,80	7,06	8,75	8,41	9,48	10,02	10,78
	1,6	3,87	6,57	8,41	10,32	10,71	11,49	12,27
1,3	1	0,38	2,84	4,56	5,44	6,90	6,90	6,90
	1,2	2,70	5,90	7,15	8,19	8,63	8,91	8,47
	1,4	3,05	4,73	6,33	7,63	9,49	9,89	9,89
	1,6	3,74	6,03	8,19	8,74	9,79	11,49	12,07

Para ambos os grupos de emissores estudados as simulações apresentaram boa capacidade em reproduzir as condições de escoamento do fluido e boa estimativa da capacidade de perda de carga ao longo do canal nas condições de vazões menores. No entanto, nas situações em que as vazões foram elevadas, as simulações apresentam tendência em superestimar os valores de perda de carga para todos os modelos avaliados neste estudo.

Os erros relativos para os valores de vazão obtidos experimentalmente e pela simulação em cada pressão foram gradualmente elevados ao aumentar-se a relação H/W . Estes resultados sugerem que as simulações apresentaram melhor estimativa de escoamento para emissores com relação H/W de 1,0, e subestimaram as velocidades de escoamento para as relações H/W maiores.

A Tabela 16 apresenta os expoentes de fluxo (x) e os coeficientes de proporcionalidade (k) das equações vazão-pressão, a vazão (q), e os erros entre os expoentes de fluxo obtidos experimentalmente e simulado para os protótipos EV.

Para os emissores do grupo EV, os expoentes de fluxo obtidos experimentalmente ficaram abaixo de 0,5 variando entre 0,453 e 0,489. Os três protótipos com razão H/W de 1,0 apresentaram os maiores valores de expoente de fluxo, sendo observados valores de 0,480, 0,478, e 0,489 para canais com largura de 0,7, 1,0, e 1,3 mm, respectivamente. Já os menores expoentes foram observados para os emissores com largura de canal de 1,3 mm com valores de 0,453, e 0,458 para as relações H/W de 1,4 e 1,6, respectivamente. Em geral, o aumento da relação H/W provocou pequenas reduções no expoente de fluxo experimentais.

Para os resultados simulados é evidente a tendência de redução do expoente a medida que aumenta-se a relação H/W e a largura do canal. Assim como nos dados experimentais, os maiores expoentes foram obtidos para as relações H/W de 1,0 com valores de 0,460, 0,455, e 0,448 para as larguras 0,7, 1,0, e

1,3, respectivamente. Por outro lado, os menores valores foram observados para as relações H/W de 1,6 com valores de 0,422, 0,416 e 0,410 para as larguras 0,7, 1,0, e 1,3, respectivamente.

Tabela 16. Parâmetros da equação característica do emissor, vazão determinada na pressão de 100 kPa e erro relativo (Er) entre valores de expoente de fluxo obtidos experimentalmente e pela simulação numérica para os emissores EV

W (mm)	H/W	EXPERIMENTAL			SIMULADO			Er de x (%)
		k	x	q (L h ⁻¹)*	k	x	q (L h ⁻¹)*	
0,7	1,0	0,162	0,480	1,47	0,169	0,460	1,40	4,13
	1,2	0,172	0,469	1,49	0,181	0,445	1,41	5,10
	1,4	0,174	0,459	1,44	0,184	0,440	1,38	4,12
	1,6	0,178	0,466	1,52	0,201	0,422	1,40	9,42
1,0	1,0	0,162	0,478	1,45	0,173	0,455	1,40	5,68
	1,2	0,172	0,469	1,49	0,188	0,436	1,40	6,92
	1,4	0,177	0,464	1,50	0,190	0,433	1,39	6,76
	1,6	0,176	0,464	1,49	0,205	0,416	1,39	10,31
1,3	1,0	0,152	0,489	1,44	0,178	0,448	1,40	8,78
	1,2	0,176	0,462	1,48	0,196	0,427	1,39	7,56
	1,4	0,183	0,453	1,46	0,210	0,410	1,39	9,41
	1,6	0,182	0,458	1,49	0,212	0,410	1,41	10,44

* Vazão obtida para a pressão de 100 kPa

Esses resultados indicam que as características geométricas dos protótipos do grupo EV proporcionam fluxo turbulento e apresentam desempenho hidráulico superior aos emissores EU. A presença de vórtice nos labirintos permite a construção de emissores com canais mais curtos e ainda contribuem com a redução do expoente de fluxo do emissor, fazendo com que a vazão se torne menos sensível a variações na pressão de operação e na temperatura da água.

Emissores que favorecem a formação de vórtices bem desenvolvidos apresentam vazão menos sensível à variações de pressão. Quando a pressão de operação aumenta, o tamanho da área de recirculação se expande e comprimem a seção transversal do fluxo principal, reduzindo sua largura e restringindo o movimento do fluido nesta região, o que permite o ajuste da vazão do emissor. O grau de retração da seção do fluxo principal, e consequentemente do nível de compensação de pressão, irá depender das características geométricas dos labirintos e do expoente de fluxo. Emissores com menor expoente apresentam maiores expansões dos vórtices e maiores retrações de seção transversal do fluxo quando há elevações na pressão, o que significa que a amplitude de ajuste da seção transversal do fluxo principal ocorre de forma mais significativa com a variação da pressão de trabalho (ZHANGZHONG et al., 2015).

Neste estudo observou-se que as relações H/W de 1,4 e 1,6 apresentaram os melhores desempenhos hidráulicos. Como estas relações proporcionam vórtices mais desenvolvidos, assume-se que variações nas dimensões das regiões de recirculação e na largura do fluxo principal, devido variações na pressão de operação, são mais significativas comparado as outras relações.

Assim como observado nos emissores EU, em todos os protótipos do grupo de emissores EV avaliados, os valores do expoente de fluxo obtidos experimentalmente foram superiores aos obtidos pelas simulações. Em geral, as variações foram maiores para os emissores com largura de canal de 1,3 mm e menores para larguras de 0,7 mm. Analisando os erros relativos para as diferentes relações H/W estudadas, observa-se que as variações foram muito próximas entre as relações H/W de 1,0, 1,2 e 1,4 para uma mesma

largura de canal. No entanto, os erros para os emissores equipados com relação H/W de 1,6 foram maiores, indicando que a capacidade de estimativa do comportamento do fluido para essa relação não é tão precisa quanto as demais relações.

Diferenças entre resultados experimentais e simulados para a curva vazão-pressão são constantemente observados na literatura, e normalmente estão associadas as variações nas estimativas das características de escoamento no interior do canal dos labirintos. Analisando o escoamento na região do fluxo principal de labirintos de gotejadores Zhangzhong et al. (2015) identificaram que a velocidade estimada do fluido, utilizando o modelo *standard $k - \epsilon$* , foi ligeiramente maior que os valores medidos, em aproximadamente 1,06 vezes, o que explica as variações entre os valores estimados e observados nas pesquisas. No entanto os autores concluem que o modelo *standard $k - \epsilon$* foi de elevada precisão e pode refletir as condições reais de fluxo nos labirintos.

Para os dados de vazão das 24 geometrias estudadas pode-se observar que os valores obtidos experimentalmente foram próximos ao valor estipulado de $1,4 \text{ L h}^{-1}$ operando sob pressão de 100 kPa. Para os emissores EU, a vazão variou entre 1,29 e $1,52 \text{ L h}^{-1}$, enquanto para os emissores EV, a vazão variou entre 1,44 e $1,52 \text{ L h}^{-1}$. As diferenças observadas entre a vazão de projeto e as vazões medidas podem ser atribuídas a imperfeições no processo de fabricação dos canais e nos procedimentos de simulação para obtenção dos comprimentos dos labirintos. De qualquer modo, para fins práticos, a diferença entre a vazão de projeto e os valores obtidos é bastante pequena evidenciando que o procedimento adotado é útil para o projeto hidráulico de emissores com características similares aqueles estudados neste trabalho.

4.5. Modelo matemático para estimativa da vazão dos protótipos, baseado em regressão

A seleção de variáveis necessárias para construir um modelo representa um problema frequente na análise de regressão relacionada à hidráulica (VILAÇA et al., 2017). A inclusão de variáveis desnecessárias no modelo complica a descrição do processo e pode resultar em previsões ruins, enquanto a omissão de variáveis importantes pode reduzir o poder de predição do modelo (CHATTERJEE; SIMONOFF, 2013). Um modelo deve ser o mais simples possível, ao mesmo tempo em que contabiliza as relações importantes nos dados. Uma abordagem para selecionar um subconjunto de variáveis que constituirão um modelo consiste em definir um critério que mede o desempenho de um modelo, avaliar o critério para cada subconjunto de variáveis potenciais, e escolher o subconjunto que otimiza o critério (SEBER; LEE, 2003). Geralmente, o modelo com o menor quadrado médio do erro deve ser escolhido (BATES; WATTS, 1988). Uma variável que não melhora o critério pode não ser significativa em descrever o processo, podendo ser excluída.

O modelo apresentado na equação (17) foi obtido a partir de tentativas com objetivo de obter um modelo o mais simples possível e com desempenho satisfatório. A equação (17) inclui o coeficiente de viscosidade cinemática da água, as características geométricas mais relevantes para as estimativas de vazão,

e a carga de pressão de operação do emissor. Como a vazão de um emissor não é significativamente influenciada pela altura do defletor (LI et al., 2006a), este parâmetro apresentou pouco impacto nos indicadores de qualidade do ajuste, e por isso não foi considerado na eq. (10).

$$q = 0,4054 \frac{\nu^{0,0037} L^{0,0040} \alpha^{0,7179}}{A^{0,0409}} h \left[0,5552 \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{0,4547} \right] \quad (17)$$

em que: q é a vazão do emissor ($L h^{-1}$); ν é o coeficiente de viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$); L é o comprimento do labirinto (mm); α é o ângulo do defletor (rad); A é a área da seção de escoamento (mm^2); h é a carga de pressão na entrada do labirinto (m). A equação (17) é válida para labirintos de formato trapezoidal com seção de escoamento retangular e foi ajustada com base em dados experimentais dentro dos seguintes limites: $45^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$; $5 m \leq h \leq 35 m$; $0,5 mm \leq W \leq 1,3 mm$; $0,7 mm \leq H \leq 2,08 mm$; $15,18 mm \leq L \leq 888,42 mm$; $0,5 mm \leq D \leq 0,8 mm$.

A Figura 49a evidencia a linearidade entre os dados observados e estimados de vazão dos emissores, tanto para o conjunto de dados de calibração quanto para o de validação. Analisando todo o conjunto de dados, o somatório dos erros ao quadrado (MSE) foi de 0,5030 e o RMSE foi de 0,0547. A Figura 49b correlaciona erros relativos das estimativas de vazão em relação aos valores observados com a frequência com que esses erros ocorreram. Analisando todo o conjunto de dados, o erro máximo das estimativas foi de 8,3%, sendo que 95% das estimativas apresentaram erro inferior a 6,05%. Tais resultados comprovam adequado ajuste do modelo matemático proposto na equação (17) e evidenciam que, embora o modelo seja bastante simples, pode ser útil para obtenção direta de estimativas entre características geométricas e operacionais de emissores similares àqueles estudados.

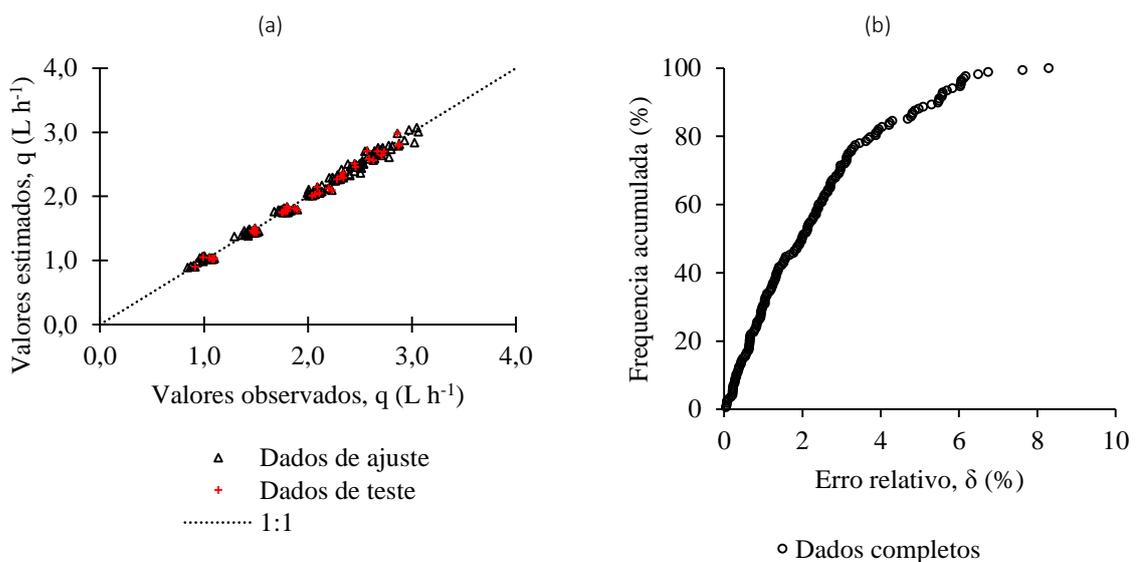


Figura 49. Valores de vazão observados versus estimados (a); análise gráfica do erro apresentando erro relativo (δ) versus frequência do erro na predição da vazão ($\delta = 100 \left| \frac{\text{observado} - \text{estimado}}{\text{observado}} \right|$)

4.6. Sensibilidade à obstrução dos emissores EU

Ao contrário do esperado, a obstrução dos emissores com características geométricas que proporcionam escoamento uniforme no canal ocorreu de forma rápida. Praticamente todos os emissores foram obstruídos antes das primeiras 8 horas de ensaio, com exceção da segunda repetição do ensaio do emissor com largura de canal de 0,8 mm e defletores inclinados em 75° que obstruiu após 24h de operação (Figura 50).

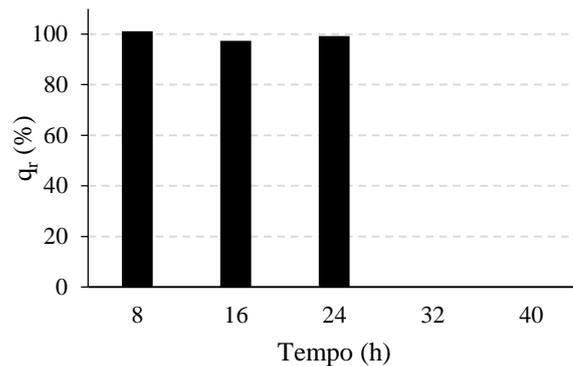


Figura 50. Vazão relativa do emissor com largura de 0,8 mm e ângulo de defletor de 75° ao longo das 40 h de ensaio

O início da obstrução do canal dos emissores estudados neste grupo ocorreu de duas formas (Figura 51): 1) o processo de obstrução foi iniciado por partículas com dimensões superiores a largura do canal do labirinto que pararam atravessadas na seção de escoamento; 2) a obstrução iniciou-se por duas ou mais partículas com dimensões inferiores a largura do canal, porém ocasionada por ligação em arco, como já descrito anteriormente.

Embora a largura e profundidade dos canais dos emissores estudados neste grupo (0,5 a 0,8 mm) serem iguais ou maiores que a faixa granulométrica das partículas utilizadas nos ensaios de obstrução ($\leq 0,5$ mm), parte dos labirintos foram obstruídos por partículas com dimensões superiores à largura do canal. Este fenômeno se deu em função da heterogeneidade das características geométricas do material de obstrução utilizado nos ensaios. Enquanto algumas partículas apresentam formato próximo a uma esfera perfeita, outras são estreitas e alongadas, o que permite sua passagem pelos crivos das peneiras, durante a fase de preparação do material de obstrução, e sua entrada no canal dos emissores durante os ensaios de obstrução. No entanto, é possível que as mudanças repentinas na direção do fluxo e o gradiente de velocidade de escoamento do fluido na seção transversal do canal promovam situação de deslocamento instável das partículas permitindo seu movimento rotacional e fazendo com que fiquem atravessadas no canal, bloqueando a passagem da água.

O comportamento destas partículas ao entrarem no canal foi aleatório, sendo que foram observados obstrução em diversos pontos ao longo do canal, não existindo tendências como obstrução apenas no início, no meio ou no final do labirinto, podendo ocorrer em qualquer posição. Tal fato contribui significativamente para explicar a grande aleatoriedade frequentemente observada em pesquisas e experimentos relacionados ao desempenho de gotejadores submetidos a operação em condições de risco de obstrução.

Por apresentarem formato irregular, quando as partículas param atravessadas no canal elas não possuem dimensões suficientes para bloquear por completo a passagem de água no labirinto, permitindo o escoamento de um pequeno fluxo. Este fluxo, apesar de menos intenso, é capaz de carrear partículas para dentro do labirinto que são retidas pelo estreitamento da seção de escoamento causado pela partícula maior, resultando em acúmulo de partículas nesta região. O acúmulo de partículas menores é contínuo e reduz gradualmente o fluxo até que o canal seja totalmente obstruído devido a formação de uma barreira impermeável devido ao acúmulo e aglomeração de partículas de argila.

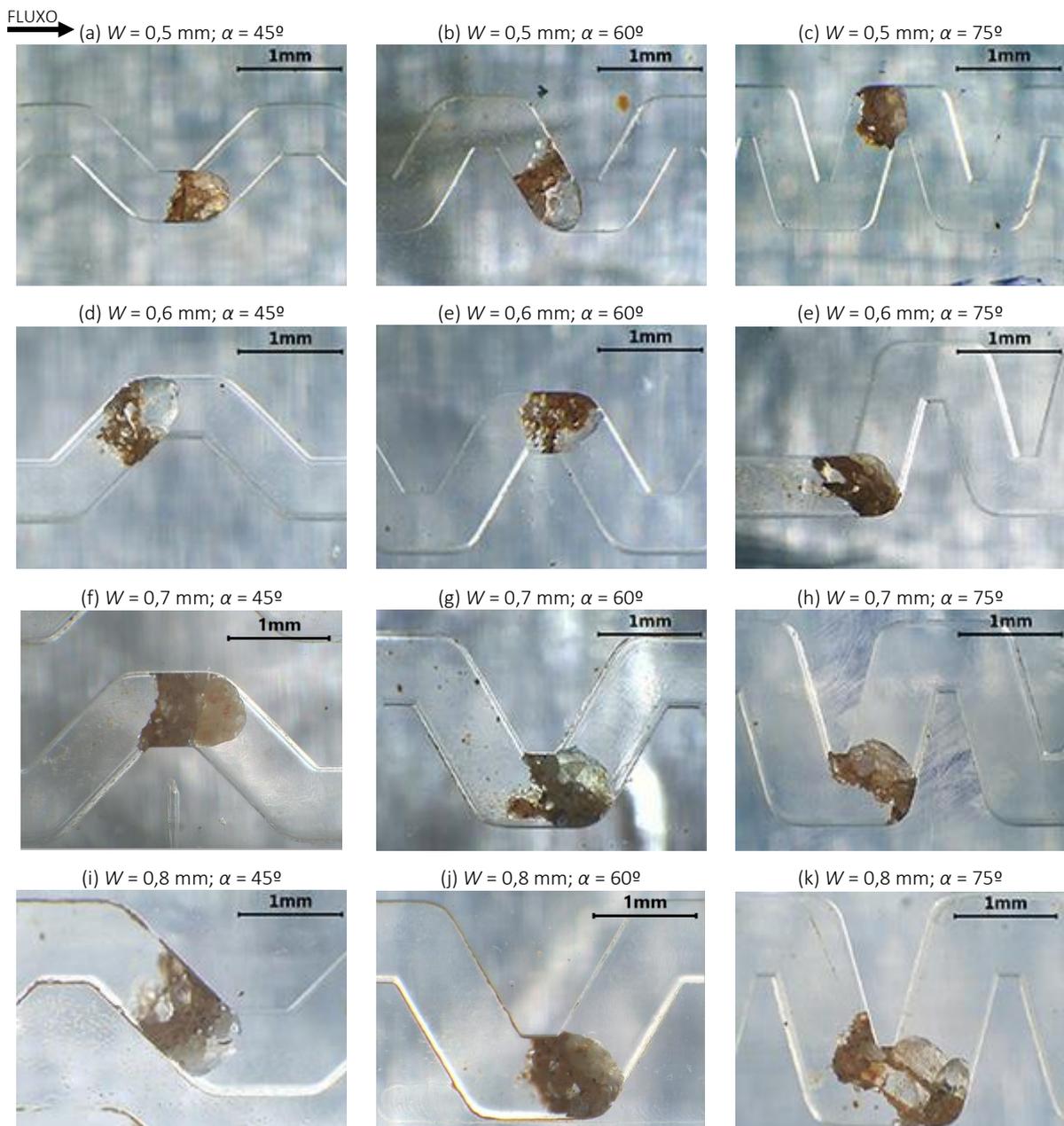


Figura 51. Canal de escoamento dos protótipos de emissores do grupo EU obstruídos por partículas com dimensões superiores à largura do canal ou por obstrução em arco

Desta forma, o processo de obstrução desta natureza pode ser dividido em três etapas: 1) início da obstrução, que ocorre com o bloqueio parcial da seção de escoamento devido a uma ou mais partículas de grandes dimensões atravessadas no canal do labirinto; 2) acúmulo contínuo e gradual de partículas menores na região do bloqueio, podendo ser chamada de gradeamento; e 3) obstrução completa do canal. As três fases podem ser observadas na Figura 52, no entanto, as imagens representam a obstrução em diferentes geometrias de labirintos.

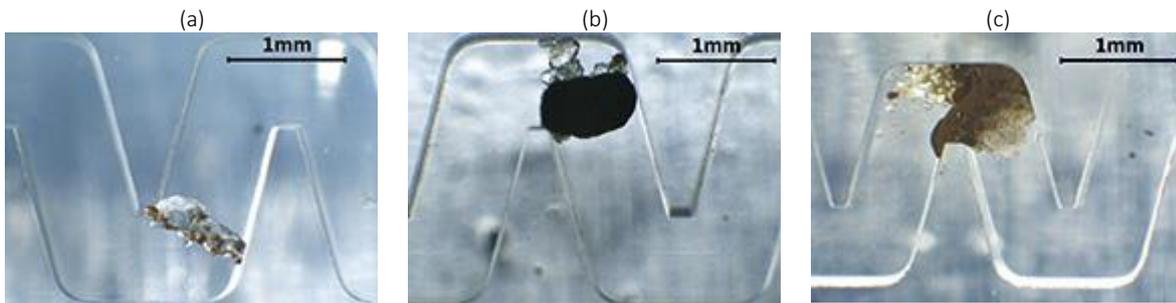


Figura 52. Fases da obstrução causada por partículas com dimensões superiores ao do canal do labirinto, sendo início da obstrução (a); acúmulo de partículas (b) e obstrução completa (c)

Em algumas situações, foi possível observar a ocorrência de desobstrução, principalmente quando o sistema é desligado ou religado. No momento em que o sistema é despressurizado, uma onda de subpressão ou variação de velocidade faz com que a água se movimente em sentido contrário, realizando em algumas situações o carregamento das partículas e desobstrução do canal. Quando o sistema é religado, a entrada de ar e água em alta velocidade dentro do canal realiza a movimentação das partículas, funcionando como uma forma de *flushing*, permitindo que as mesmas desenrosquem e sejam carregadas para fora do canal. Esse fenômeno funciona de forma similar ao que ocorre em linhas laterais, sendo um dos métodos utilizados para limpeza dos tubos gotejadores utilizados na irrigação localizada.

Durante os ensaios, uma terceira forma de desobstrução foi observada. Quando há apenas uma partícula bloqueando o canal, as partículas que entram devido ao fluxo existente se chocam com a partícula atravessada, movimentando-a e desobstruindo por completo o canal, e permitindo que a vazão inicial seja restabelecida. No entanto, as desobstruções ocorrem apenas quando o processo de obstrução encontra-se nas fases iniciais, em que ainda há fluxo de água no canal. Após obstrução completa a formação da massa de partículas finas (argila, silte e areia fina) agregadas atua como um agente cimentante e impossibilita a movimentação de qualquer partícula no interior do canal devido ao bloqueio completo da passagem de água.

A solução para evitar obstrução desta natureza seria a utilização de sistemas de filtragem ou a adoção de um pré-filtro na entrada do labirinto com abertura compatível com a largura do canal a fim de evitar a entrada de partículas que possivelmente poderiam bloquear a passagem de água. Li et al. (2006a) observaram que se fosse utilizado um dispositivo de filtragem com abertura de 1/10 da largura do canal, a maioria das partículas que causaram a obstrução dos emissores seriam removidos antes de atingir o canal dos emissores estudados.

Como a sensibilidade dos labirintos à obstrução foi limitada pela largura dos canais e pela granulometria das partículas, não foi possível observar o efeito do ângulo dos defletores no desempenho antiobstrução dos emissores e na sedimentação de partículas no interior do canal. No entanto Li et al. (2006a) observaram que o ângulo dos defletores foi um dos fatores mais significativos na capacidade antiobstrução dos emissores.

Em geral, labirintos equipados com defletores mais inclinados tendem a apresentar maior sensibilidade à obstrução (YU et al., 2018c). Adotando a mesma convenção deste estudo para representar o ângulo dos defletores, Yu et al. (2018c) avaliaram labirintos com defletores inclinados em 45°, 60°, 67,5° e 75° operando com solução contendo partículas com diâmetro máximo de 125 µm e concentração de 10 g L⁻¹. Segundo os autores, os emissores com ângulos de 45°, 60°, 67,5° e 75° alcançaram o valor de 75% de redução de vazão após o 11°, 10°, 7° e 6° dia de ensaio, ou seja, labirintos com defletores mais inclinados são obstruídos mais rápido.

Para verificar o efeito do ângulo dos defletores na sensibilidade dos emissores estudados neste grupo, é necessário a realização de mais ensaios. Os testes devem ser conduzidos utilizando diferentes faixas granulométricas e concentrações, permitindo identificar se a sedimentação de partículas ocorre no interior do canal e verificar qual a granulometria específica que afeta o desempenho do emissor. Estes testes poderão ser realizados em trabalhos futuros tendo como objetivo uma análise minuciosa dos padrões de movimentação de partículas nos labirintos e de tendências de sedimentação e acúmulo de partículas.

4.7. Sensibilidade à obstrução dos emissores EV

As vazões relativas observadas ao longo dos ensaios de obstrução, nas duas repetições, para os emissores com largura de canal de 1,3 e 1,0 mm e com diferentes relações H/W são apresentadas nas Figura 53 e Figura 54 respectivamente. Em todos os protótipos com ambas larguras de canal foram observados oscilações nos valores de vazão, ocorrendo reduções e elevações da vazão ao longo dos ensaios de obstrução. Estas variações ocorreram de forma aleatória e por isso não foi possível estabelecer padrões ou correlacioná-las com as duas larguras de canais ou as diferentes relações H/W estudadas.

Para considerar os emissores como obstruídos, convencionalmente a literatura tem adotado como critério valores de vazão relativa inferior à 75% (QINGSONG et al., 2008; WEI et al., 2008; ZHANG et al., 2017). Sob as condições de ensaios avaliadas neste estudo as maiores reduções de vazão para os emissores com largura de canal de 1,3 mm foram de 3,2% após 32h de ensaio para o labirinto com relação H/W de 1,2, na segunda repetição. Já para os emissores com canal de 1,0 mm de largura a maior redução de vazão foi de 3,5% para o labirinto com relação H/W de 1,0 também após 32h de ensaio na segunda repetição. Estes valores de redução de vazão estão muito abaixo do limiar que caracteriza um emissor obstruído, podendo dizer que as variações de vazão não foram significativas.

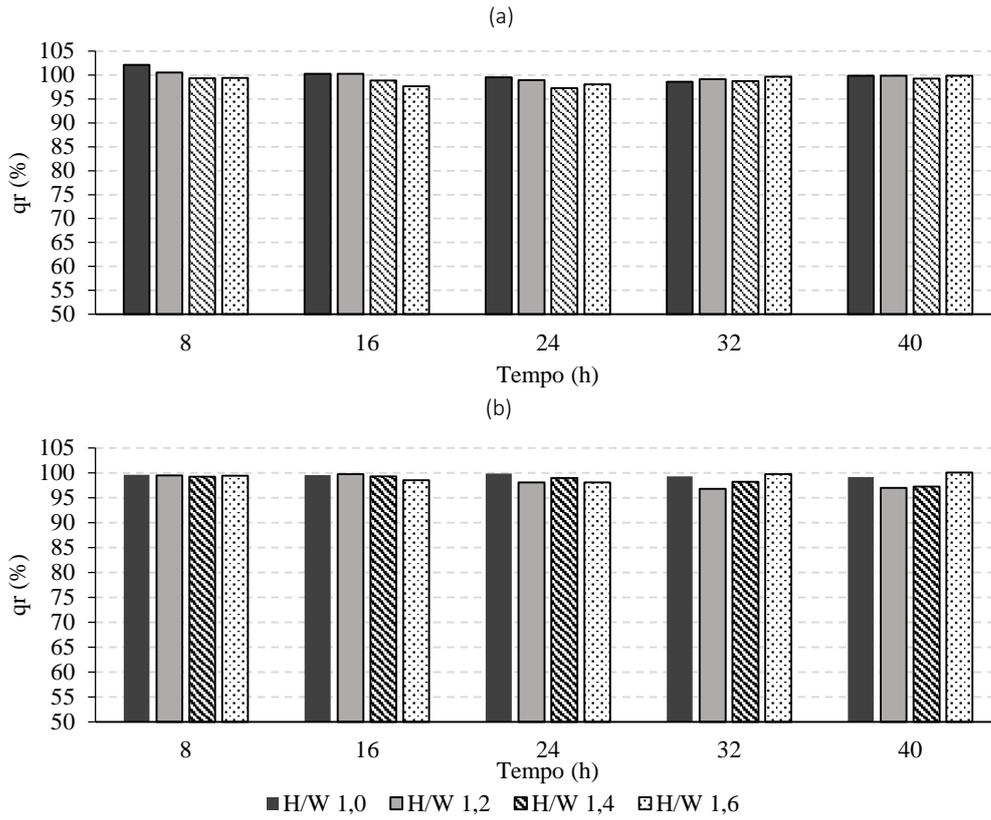


Figura 53. Efeito das diferentes relações H/W na vazão relativa para os protótipos com largura de canal de 1,3 mm ao longo dos 5 dias de ensaio na repetição 1 (a) e repetição 2 (b)

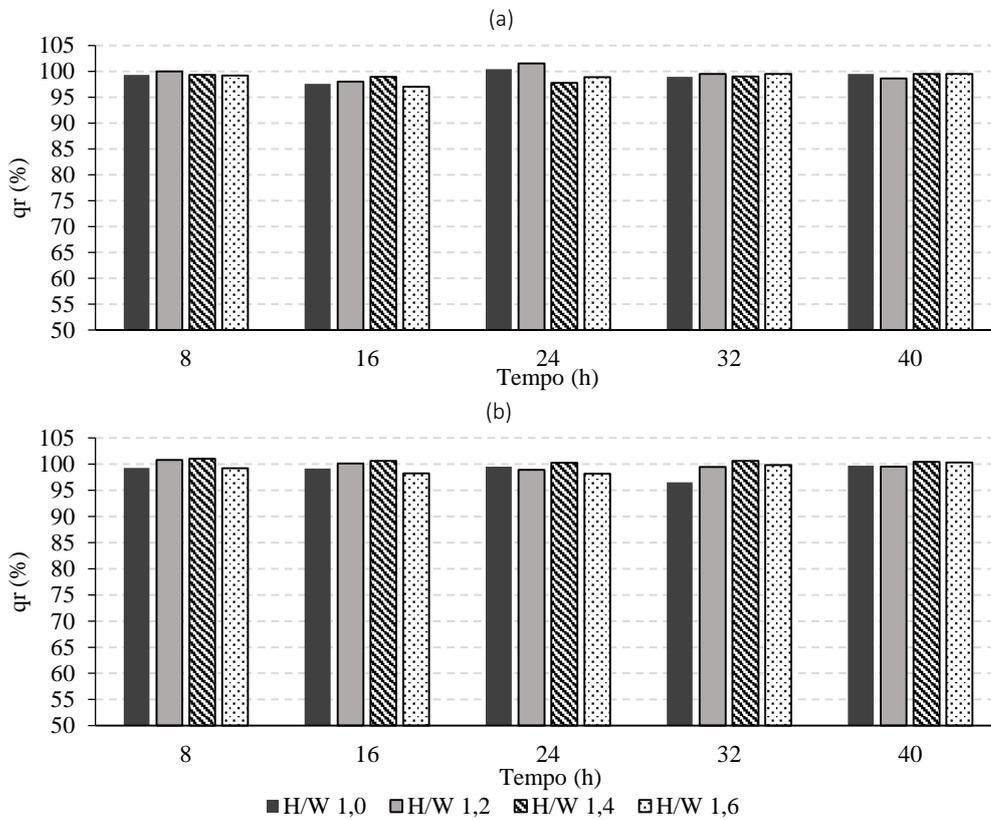


Figura 54. Efeito das diferentes relações H/W na vazão relativa para os protótipos com largura de canal de 1,0 mm ao longo dos 5 dias de ensaio na repetição 1 (a) e repetição 2 (b)

Com relação aos emissores com largura de canal de 0,7 mm, todos os protótipos foram extremamente sensíveis à obstrução, sendo que nenhum emissor chegou ao fim das 40 h de ensaio em funcionamento. Praticamente todos os emissores foram obstruídos no primeiro dia de ensaio, com exceção dos protótipos com relação H/W de 1,4, na primeira repetição, e 1,6, na repetição dois, como mostra a Figura 55.

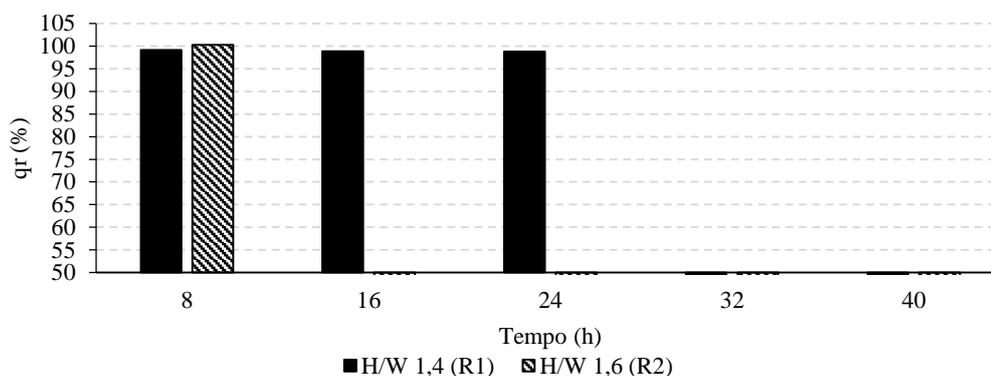


Figura 55. Vazão relativa para os protótipos com largura de canal de 0,7 mm com relação H/W de 1,4 e 1,6 ao longo dos 5 dias de ensaio

4.7.1. Deposição de partículas no interior dos labirintos dos gotejadores EV

Buscando compreender o processo de obstrução de emissores causado pelo acúmulo de partículas no interior do canal foram obtidas imagens de dentro dos labirintos. As imagens permitiram identificar os locais que ocorreram sedimentação de partículas e obter informações que caracterizem este processo.

As imagens do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,3 mm nas quatro relações H/W estudadas, após 8, 24 e 40 horas de funcionamento, são apresentadas na Figura 56. Os locais em que ocorre acúmulo de partículas é praticamente os mesmos para todas as relações H/W estudadas, ou seja, próximo a parede localizada atrás do primeiro defletor. Acúmulo de partículas de areia foi mais expressivo na região da primeira câmara de vórtice, localizada na parte superior das figuras, onde podemos verificar grande quantidade de sólidos depositados (região demarcada em vermelho na Figura 56a). Na segunda câmara de vórtice, parte inferior da imagem, a sedimentação de areia foi pequena, apresentando apenas algumas partículas. Além da sedimentação de partículas de areia, no primeiro defletor houve desenvolvimento de um material com textura gelatinosa que pode ser uma mistura de biofilme e partículas finas aderidas. Este material foi identificado na primeira câmara de vórtice, que coincide com o local de acúmulo de areia, na segunda câmara de vórtice (demarcada em amarelo na Figura 56i) e na entrada do labirinto (demarcado em azul na Figura 56i). O acúmulo de biofilme foi mais expressivo nos labirintos com relação H/W de 1,4 e 1,6.

Ao longo dos ensaios foi possível observar que a quantidade de partículas de areia acumuladas no primeiro defletor é praticamente estável, não apresentando variações significativas entre o primeiro e último dia de ensaio. No entanto, o biofilme desenvolveu-se de forma gradual, sendo observado em maior quantidade após 40 horas de ensaio para os quatro emissores com largura de canal de 1,3 mm.

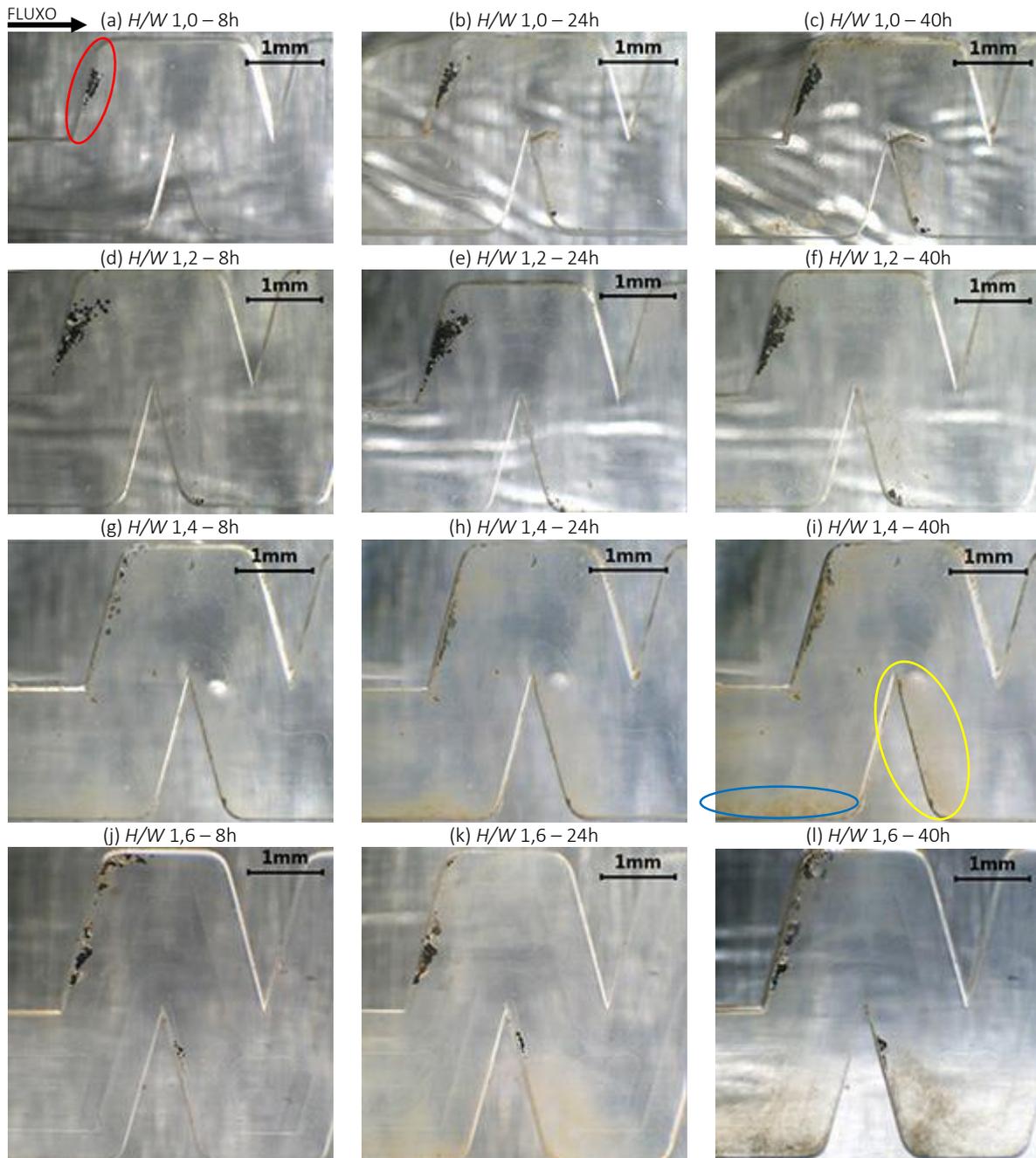


Figura 56. Imagens do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,3 mm para as quatro relações H/W estudadas obtidas após 8, 24, e 40 h de funcionamento

As imagens do primeiro defletor dos emissores com largura de canal de 1,0 mm nas quatro relações H/W estudadas, obtidas após 8, 24 e 40 horas de funcionamento, são apresentadas na Figura 57.

Nos emissores com largura de canal de 1,0 mm não foi observado acúmulo de partículas de areia no primeiro defletor em nenhuma das relações H/W estudadas. No entanto, foi verificado o desenvolvimento de biofilme na entrada do canal e nas duas primeiras câmaras de vórtices, semelhante aos emissores com largura de canal de 1,3 mm. Nas primeiras 8 horas de funcionamento não houve desenvolvimento de grande quantidade de biofilme em nenhum dos emissores estudados. Devido a limitações dos instrumentos utilizados não foi possível quantificar o desenvolvimento do biofilme, no

entanto, as imagens sugerem que a quantidade acumulada aumentou de forma gradual até 40 horas de operação.

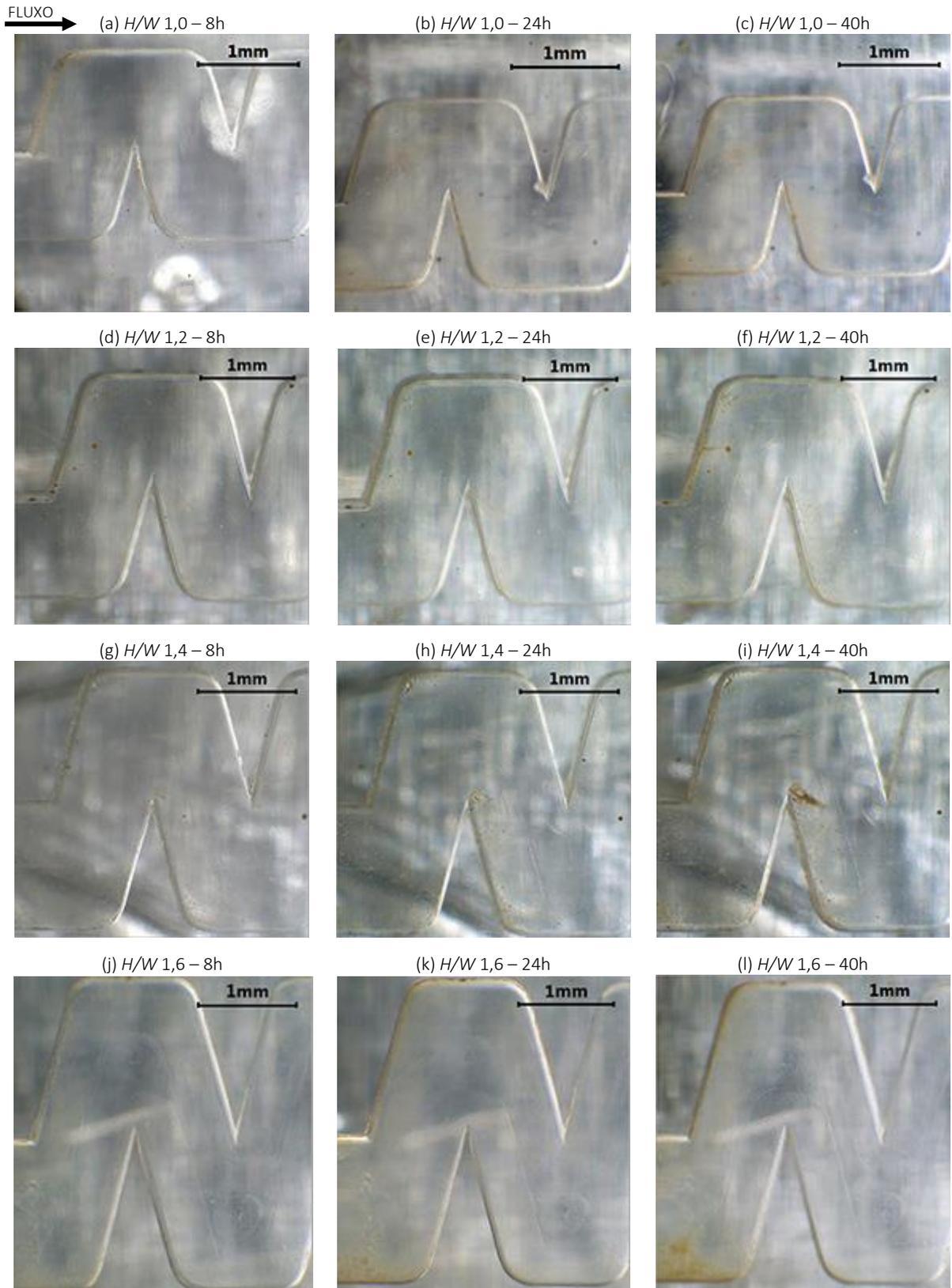


Figura 57. Imagens do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,0 mm para as quatro relações H/W estudadas obtidas após 8, 24, e 40 h de funcionamento

A Figura 58 mostra o interior do quinto defletor dos labirintos com largura de canal de 1,3 mm nas quatro relações H/W após 40 horas de funcionamento. As imagens mostram que no fim do ensaio os canais permaneceram praticamente limpos, não havendo presença de partículas sedimentadas ou desenvolvimento de biofilme. A mesma tendência foi observada para os emissores com largura de canal de 1,0 mm e por isso não foram apresentadas aqui as imagens referentes a esses emissores.

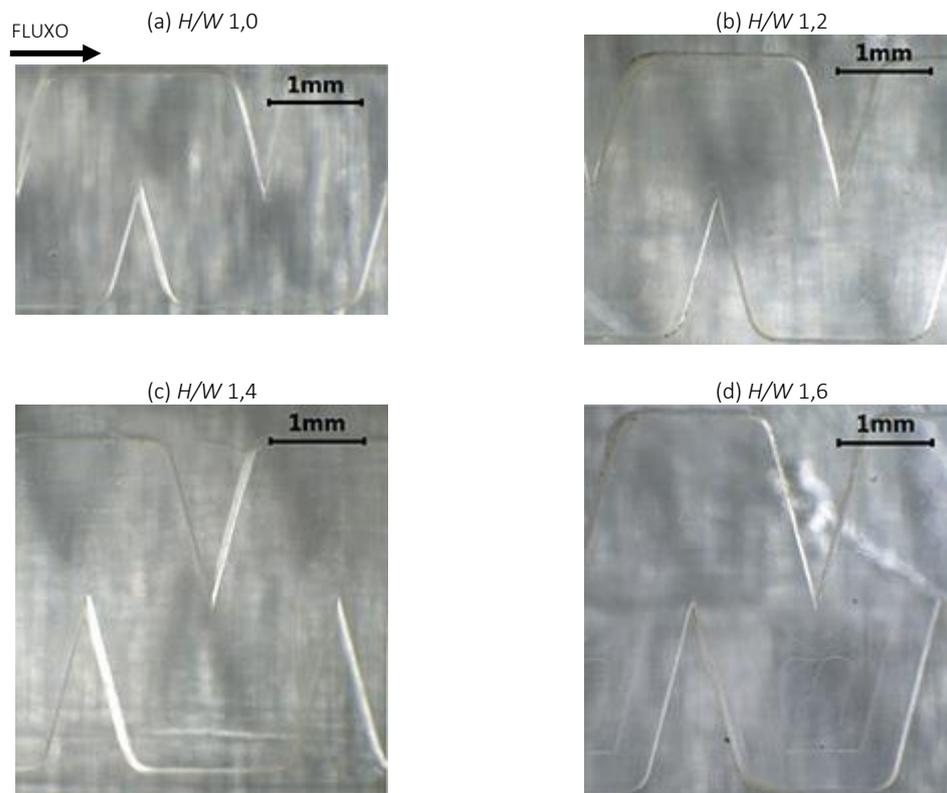


Figura 58. Imagens do quinto defletor dos labirintos com largura de canal de 1,3 mm com relação H/W de 1,0 (a); 1,2 (b); 1,4 (c); e 1,6 (d)

O acúmulo de partículas e o desenvolvimento de biofilme no primeiro defletor está relacionado com as características de escoamento no início do labirinto. Como discutido nos tópicos anteriores, o escoamento nesta região é instável e por isto os vórtices são pouco desenvolvidos proporcionando velocidade de escoamento que não são suficientes para manter as partículas em suspensão, ou evitar o desenvolvimento de biofilme.

A mesma tendência foi observada por Ait-Mouheb et al. (2019). Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a formação de incrustações de argila e biofilme ocorrem nas mesmas áreas do labirinto em ambos os casos, e são significativamente influenciados pela característica de escoamento nestas regiões. Segundo os autores a deposição de partículas de argila ocorreu principalmente nas regiões de vórtice do primeiro defletor, justificado pela baixa velocidade de escoamento e pela baixa intensidade da energia cinética turbulenta, que favorece a deposição e acúmulo de partículas nas zonas de vórtice.

Em relação à formação de biofilme, há muitos fatores que afetam o desenvolvimento de biofilme em sistemas de irrigação por gotejamento, incluindo comportamento dinâmico do fluido (velocidade e força

de cisalhamento), quantidade de nutrientes e bactérias suspensas, temperatura da água e propriedades do material utilizado na fabricação do equipamento, o que influencia na rugosidade e na tensão superficial (GOUIDER et al., 2009; HORN; REIFF; MORGENROTH, 2003; QIAN et al., 2017). Em condições hidrodinâmicas, a velocidade da água e a força de cisalhamento tem sido relatado como um dos fatores predominantes na taxa de crescimento de biofilme em tubos (LI et al., 2012a) e labirintos de gotejadores (QIAN et al., 2017). Neste trabalho, o desenvolvimento de biofilme se iniciou no primeiro defletor dos labirintos em regiões que coincidem com a sedimentação de partículas. As baixas velocidades de escoamento e baixa força de cisalhamento nestas regiões favoreceram o desenvolvimento gradual de biofilme. No entanto nos defletores posteriores, em que o fluxo mostra-se como estável, as elevadas velocidades de escoamento induzem forças de cisalhamento que dificultam a formação de biofilme. A mesma tendência foi observada por Ait-Mouheb et al. (2019) apresentando as mesmas justificativas para os resultados obtidos.

Apesar da utilização de água deionizada durante os experimentos, o que minimiza a disponibilidade de nutrientes às bactérias, foi observado desenvolvimento gradual de biofilme nos labirintos entre o início e o fim dos ensaios. Mesmo não realizando análise química e microbiológica da água durante a condução dos experimentos, considerou-se que ao adicionar partículas de argila, silte e areia de origem natural, é possível que houve também adição de nutrientes à solução, que estariam previamente presentes no solo utilizado nos ensaios, dando origem a formação do biofilme.

Os diferentes padrões de acúmulo de partículas e desenvolvimento de biofilme entre os labirintos com largura de canal de 1,0 e 1,3 mm também estão relacionadas com variações nas características de escoamento no primeiro defletor. O acúmulo de partículas de areia somente nos canais com largura de 1,3 mm sugere que a velocidade de escoamento na região no primeiro defletor é inferior a velocidade de escoamento na mesma região dos emissores com largura de canal de 1,0 mm. Além das diferentes dimensões do canal, este fenômeno possivelmente ocorre devido à diferença de velocidade média de escoamento em cada uma das larguras para proporcionar a vazão de $1,4 \text{ L h}^{-1}$ associada às maiores dimensões do canal, já que a velocidade média no emissor com largura de 1,3 mm é inferior.

Na tentativa de caracterizar o movimento do fluido no primeiro defletor dos labirintos com largura de 1,0 e 1,3 mm e associar com a suscetibilidade à sedimentação de partículas, buscou-se identificar diferenças entre o perfil de velocidade de escoamento nas regiões periféricas do vórtice em ambas larguras de canal estudadas. A análise foi realizada baseando-se nos resultados obtidos a partir das simulações numéricas, porém, não foi observada diferenças significativas na velocidade de escoamento do fluido na região de interesse. Desta forma é possível que o modelo numérico utilizado apresente limitações em representar e estimar o escoamento na região do primeiro defletor.

Para os labirintos com largura de 1,3 mm as partículas de areia que sedimentaram no início do canal apresentam diâmetro inferior a 0,17 mm em todas as relações H/W . Apesar de ter sido utilizado partículas com granulometria de até 0,5 mm, a sedimentação ocorreu apenas para uma faixa granulométrica menor. Por outro lado, partículas finas que compõe a faixa granulométrica das argilas não sedimentaram em nenhuma das geometrias estudadas. Normalmente sedimentação e acúmulo de partículas de argila e que podem proporcionar alterações na vazão dos emissores ocorrem no início dos labirintos (NIU; LIU; CHEN,

2013). Porém, as concentrações de partículas de argila e silte utilizadas nos ensaios de obstrução para este estudo foram relativamente baixas. Niu, Liu e Chen (2013) observaram sedimentação de partículas de argila no interior do canal e variações de vazão apenas para concentrações de argila superiores a 1250 mg L^{-1} enquanto Oliveira et al. (2017) observaram variações de vazão em níveis significativos para concentrações de argila superior a 1000 mg L^{-1} . A sedimentação de partículas no interior dos labirintos também é influenciada pela natureza das argilas presente na água (AIT-MOUHEB et al., 2019; BOUNOUA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017). Desta forma, a pequena concentração de partículas de argila associada às características hidrodinâmicas e natureza da argila, pode ter contribuído com a não formação de agregados, o que impossibilita a sedimentação do material.

Os labirintos estudados neste grupo foram desenvolvidos com características construtivas que permitem a formação de vórtices. Como discutido anteriormente, os vórtices são mecanismos importantes do ponto de vista hidráulico, pois auxiliam na dissipação de energia, desempenhando um papel importante no controle da vazão e permitindo a construção de labirintos com dimensões praticáveis pela indústria. No entanto, os vórtices são regiões com baixa velocidade de escoamento e por isso possibilitam deposição e acúmulo de partículas no interior do canal (AL-MUHAMMAD; TOMAS; ANSELMET, 2016; WEI et al., 2012) podendo influenciar negativamente quando analisados do ponto de vista de resistência à obstrução. Durante a movimentação no interior do labirinto, as partículas sólidas podem ser arrastadas para o centro do vórtice, ocorrendo acúmulo gradual no fundo do labirinto.

A trajetória de uma partícula em movimento é definida pelas forças de inércia e de arraste que atuam sobre a mesma. Quando a partícula é pequena (diâmetro $\leq 5 \mu\text{m}$) há predomínio de forças de arraste, enquanto que em partículas maiores (diâmetro $\geq 300 \mu\text{m}$) forças de inércia são dominantes (JUN et al., 2007). Dependendo das características construtivas do labirinto e das condições de escoamento, as partículas de maiores dimensões são mais propensas à entrarem nas regiões dos vórtices, uma vez que o predomínio das forças de inércia faz com que as partículas saiam da região do fluxo principal em direção às regiões de vórtices, enquanto partículas finas tendem a movimentar-se preferencialmente na região do fluxo principal (YU et al., 2018b). Ao entrar na região de recirculação, onde o escoamento apresenta baixa velocidade, as partículas de grandes dimensões podem sedimentar, ocorrendo o aumento da deposição de partículas causando alterações de fluxo no interior do labirinto (AL-MUHAMMAD; TOMAS; ANSELMET, 2016; ZHANG et al., 2010).

Durante os ensaios de obstrução mesmo nos labirintos que induzem a formação de grandes zonas de recirculações, como é o caso das geometrias com relação H/W de 1,6, não foi observado sedimentação e acúmulo de partículas sólidas nos vórtices localizados após o primeiro defletor, indicando que partículas com diâmetro inferior a 0,5 mm não são capazes de se depositarem nas condições avaliadas neste estudo. É possível que ao entrar nos vórtices, as partículas sofram ação da força centrífuga devido ao movimento circular, fazendo que permaneça nas regiões periféricas dos vórtices. Como as regiões periféricas apresentam velocidades de escoamento maiores que o centro do vórtice, as partículas passam a ser carregadas pelo fluxo, devido a ação da força de arraste, percorrendo as extremidades dos vórtices e retornando à região do fluxo principal. Efeito semelhante a este tem sido relatado na literatura, sendo chamado de autolimpeza. Feng et

al. (2017) observaram que ao modificar as características dos labirintos e permitir o melhor desenvolvimento dos vórtices, a velocidade de escoamento na região periférica das zonas de recirculação aumentaram, melhorando capacidade de autolimpeza do canal e melhorando a resistência à obstrução do emissor. Este efeito permite que o fluxo lave a parede do canal e as regiões próximas e evite o acúmulo de partículas, o que reduz a suscetibilidade do emissor à obstrução.

A baixa concentração de partículas utilizada durante os ensaios de obstrução também pode ter contribuído com a ausência de acúmulo de sedimentos nos vórtices. As regiões de recirculação podem ter efeitos de armazenamento de partículas (YU et al., 2018b, 2018c) uma vez que o sedimento entra na região do vórtice e pode permanecer em movimento circular por um longo período, sem retornar para a região do fluxo principal. Quando este efeito é associado a presença de grande quantidade de partículas na água, o armazenamento de diversas partículas nos vórtices pode elevar a concentração e favorecer a sedimentação e acúmulo, fazendo com que a presença dos vórtices tenha efeito significativo na sensibilidade à obstrução. Em experimentos realizados por Yu et al. (2018c) foi identificado que emissores com geometrias que permitem a formação de vórtice foram sensíveis à obstrução quando operados utilizando solução contendo partículas sob elevada concentração (10 g L^{-1}).

Nos casos em que as partículas são retidas em regiões de vórtices e estagnação pode ocorrer redução da seção de escoamento, diminuindo a vazão do emissor, ou em casos mais severos, interrompendo por completo o fluxo de água (JUN et al., 2007; WEI et al., 2012; ZHANG et al., 2010). A deposição de partículas no interior do labirinto dos gotejadores também pode causar um ligeiro aumento na vazão de emissores não regulados. Este efeito tem sido atribuído ao acúmulo de partículas nas regiões de recirculação, o que reduz a magnitude do vórtice e conseqüentemente pode diminuir a intensidade da dissipação da energia hidráulica, de modo que a perda de carga é reduzida, aumentando a velocidade de escoamento e conseqüentemente aumento da vazão do emissor (AL-MUHAMMAD; TOMAS; ANSELMET, 2016; ZHANG et al., 2010).

Neste estudo, os labirintos com largura de canal de 1,3 mm permitiram o acúmulo de partículas no primeiro defletor dos emissores. No entanto os efeitos relacionados à sedimentação de partículas no interior do canal não foram observados, uma vez que não houve variações significativas na vazão dos emissores. É possível que a quantidade de partículas acumuladas tenha sido pequena o suficiente para afetar de forma expressiva as características de escoamento no labirinto.

Com relação aos emissores com largura de canal de 0,7 mm, como apresentado anteriormente, foram obstruídos por completo antes do fim dos ensaios de obstrução. Ao analisar as imagens obtidas do interior do canal dos labirintos (Figura 59) observou-se que o processo de obstrução nestes emissores ocorreu de forma semelhante aos emissores EU, ou seja, causado por partículas com dimensões superiores à largura do canal ou por duas ou mais partículas ligadas em ponte que bloquearam a passagem de água. Os locais de obstrução foram aleatórios, ocorrendo em diferentes pontos dos canais dos labirintos.

Diante dos resultados obtidos, observamos que a largura do canal foi um fator limitante no desempenho dos emissores quando analisados do ponto de vista da resistência à obstrução. Enquanto todos os labirintos com largura de canal igual ou inferior a 0,8 mm foram totalmente obstruídos, o desempenho

dos labirintos com largura de 1,0 e 1,3 mm praticamente não foi afetado pelas partículas sólidas em suspensão. Pode-se perceber também que tanto a sedimentação de partículas quanto a formação de biofilme ocorrem nas regiões mais próximas a entrada do labirinto, sendo um fator de relevância na obstrução de emissores.

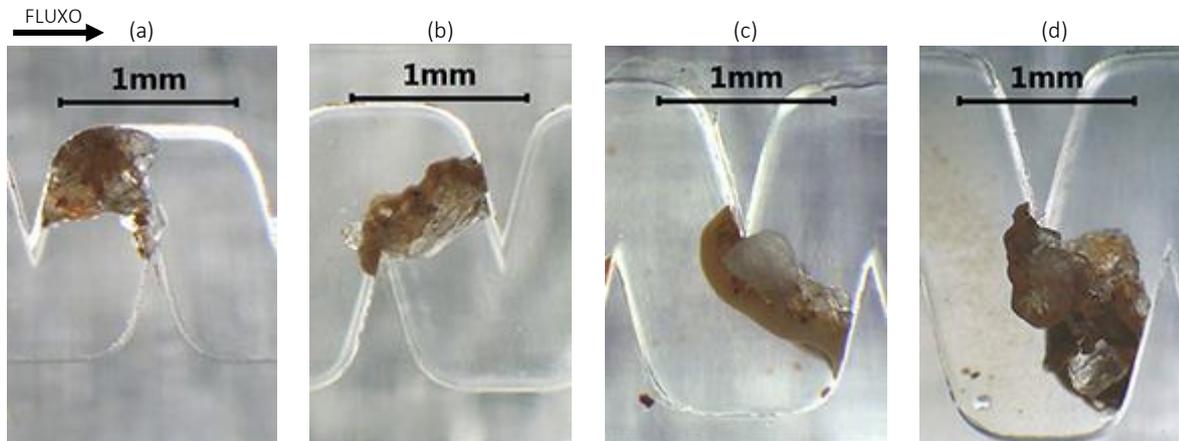


Figura 59. Emissores EV com largura de canal de 0,7 mm com relação H/W de 1,0 (a); 1,2 (b); 1,4 (c); e 1,6 (d) obstruídos por partículas sólidas

A partir dos resultados obtidos e admitindo o protocolo de ensaios proposto, recomenda-se que o desempenho de emissores operados sob condições de risco de obstrução deve ser avaliado tendo em vista dois critérios: (1) o emissor deve apresentar características geométricas que evitem a obstrução por partículas relativamente grandes, sendo que, a seção de escoamento deve ser grande o suficiente para evitar esse problema; (2) o emissor deve apresentar características geométricas que evitem a deposição de partículas em uma quantidade suficiente para reduzir a vazão do emissor.

4.8. Ensaio de obstrução prolongado

Pelos resultados obtidos nos ensaios de obstrução apresentados anteriormente verificou-se que a quantidade de material acumulado no início do canal e no primeiro defletor não foram suficientes para afetar significativamente a vazão dos protótipos. Por isso foi executado um ensaio com maior tempo de exposição dos labirintos operando sob risco de obstrução a fim de verificar o desempenho dos emissores a longo prazo. O ensaio foi conduzido por um período de 240 horas de funcionamento avaliando os emissores com largura de 1,0 e 1,3 mm na relação H/W de 1,6. As características deste ensaio seguem o mesmo padrão dos ensaios de obstrução apresentados anteriormente, sendo a única diferença o maior tempo de exposição que foi de 30 dias de operação divididos em 6 semanas.

A Figura 60 apresenta a vazão relativa ao longo do ensaio de obstrução para os dois protótipos avaliados. Observa-se que não houve variações de vazão significativas ao longo do ensaio, sugerindo que os emissores com essas características construtivas não são afetados por partículas sólidas presente na água de irrigação nas condições estudadas.

Analisando o interior do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,0 e 1,3 mm (Figura 61 e Figura 62, respectivamente) ao longo das 240 horas de ensaio, observamos que houve aumento na quantidade de biofilme desenvolvido entre 40 e 80 horas de ensaio em ambos os emissores. No entanto, após 80 horas a quantidade de biofilme não varia significativamente, ou seja, o biofilme desenvolve-se em um nível máximo e posteriormente estabiliza-se. Com relação ao acúmulo de partículas de areia, mesmo após longo período de exposição, foi observado presença de partículas apenas nos labirintos com largura de canal de 1,3 mm. Para este emissor observamos que houve um pequeno aumento na quantidade de partículas acumuladas até 120 h de funcionamento, estabilizando-se após este tempo.

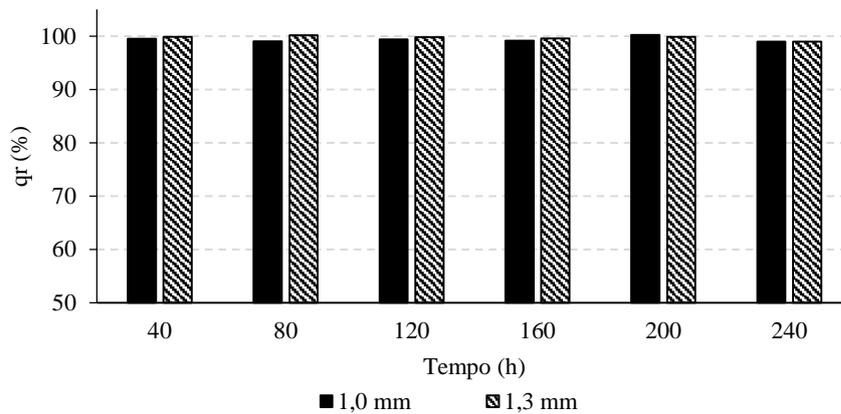


Figura 60. Efeito do tempo de exposição prolongado na vazão relativa dos protótipos com largura de canal de 1,0 e 1,3 mm com relação H/W 1,6

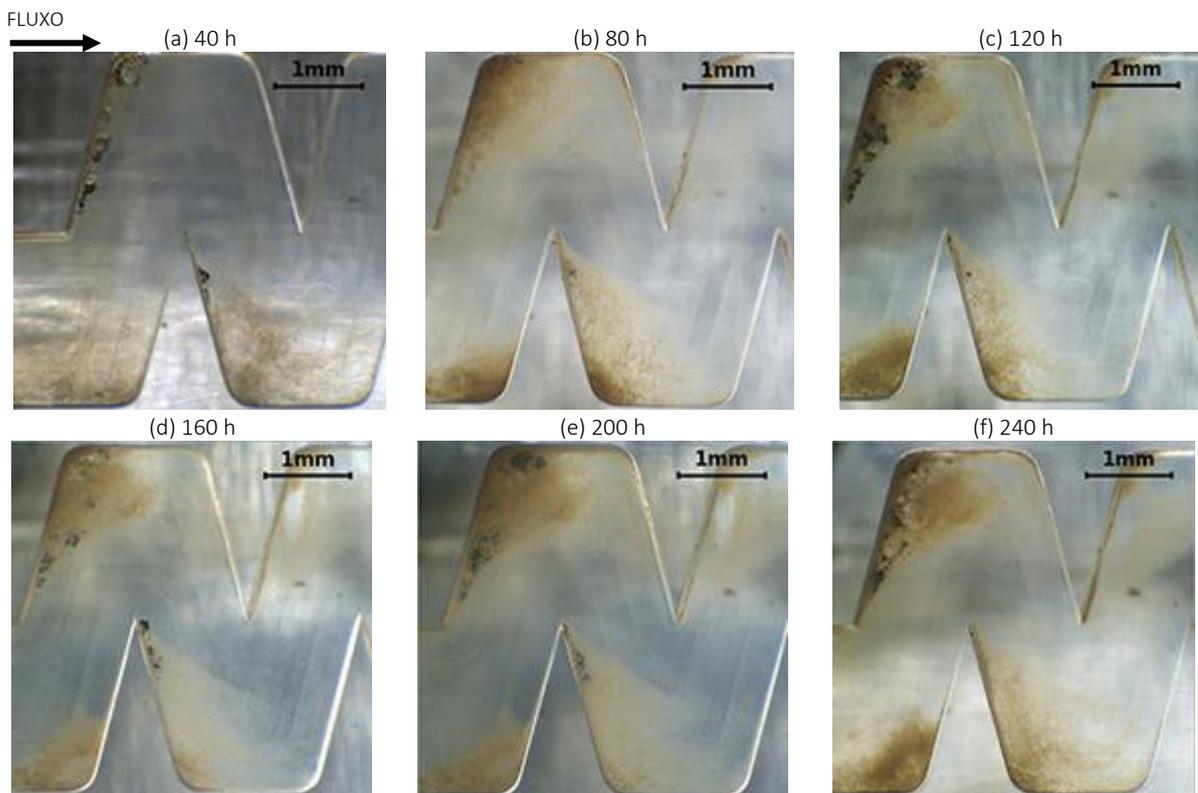


Figura 61. Imagens do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,3 mm e relação H/W 1,6 a cada 40 horas de funcionamento

A mesma tendência para o desenvolvimento do biofilme no labirinto dos emissores foi identificada por Ait-Mouheb et al. (2019). Os autores observaram que no início do canal houve desenvolvimento significativo de biofilme, com área de superfície do biofilme cobrindo 67% da largura do canal após 72 h de funcionamento. Observaram também que a incrustação de biofilme se tornou constante após 120 h, permanecendo até o final do ensaio que teve duração de 168 h.

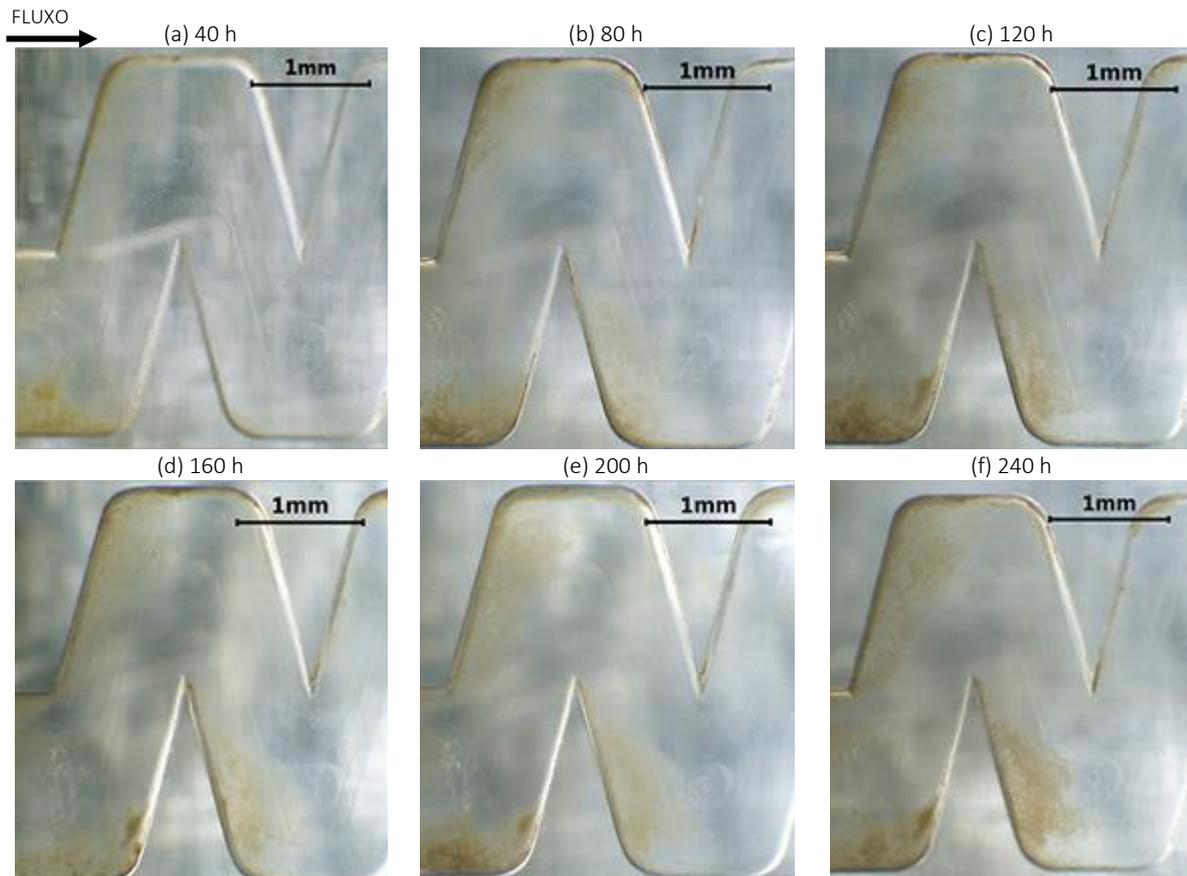


Figura 62. Imagens do primeiro defletor dos labirintos com largura de canal de 1,0 mm e relação H/W 1,6 a cada 40 horas de funcionamento

A Figura 63 mostra a região do quinto defletor dos dois labirintos avaliados nesta etapa após 240 horas de ensaio. Observou-se que após o primeiro defletor não houve sedimentação de partículas e desenvolvimento de biofilme nas regiões dos vórtices e no centro do canal. No entanto, identificou-se pequeno desenvolvimento de biofilme nos cantos superior e inferior e próximo ao pico do defletor nas regiões posteriores ao defletor. O desenvolvimento de biofilme nestas regiões está associado a baixa velocidade de escoamento que ocorrem nestes pontos, que podem ser observados nos resultados das simulações anteriormente apresentados. Estes locais podem ser chamados de regiões de estagnação e além do desenvolvimento de vórtices podem favorecer a sedimentação e acúmulo de partículas.

Durante os ensaios foi observado pequenas variações nas características de acúmulo de partículas e de biofilme no primeiro defletor dos labirintos, indicando que o material está sujeito à movimentação ou

podendo ser subsistido no decorrer do ensaio. Estas variações foram resultado da autolimpeza por meio da remoção das partículas no momento do acionamento do sistema. Para caracterizar o processo de autolimpeza foram capturadas imagens do primeiro defletor dos emissores com largura de canal de 1,3 mm antes e depois do acionamento do sistema após 232 h de funcionamento (Figura 64). Observou-se que ao acionar o sistema a entrada de ar e água em alta velocidade dentro do canal realizaram a movimentação do material sedimentado, funcionando como uma forma de *flushing*, removendo e carregando as partículas e parte do biofilme para fora do canal. No entanto este fenômeno foi mais expressivo para os emissores com largura 1,3 mm.

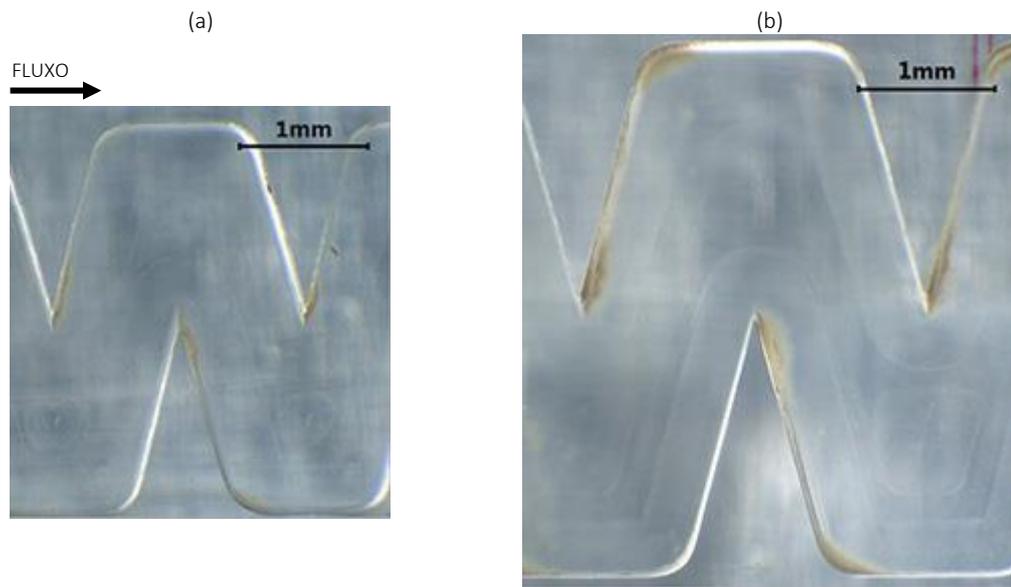


Figura 63. Desenvolvimento de biofilme no quinto defletor do labirinto com largura de canal de 1,0 mm (a) e 1,3 mm (b) com relação H/W de 1,6 após 240 h de funcionamento

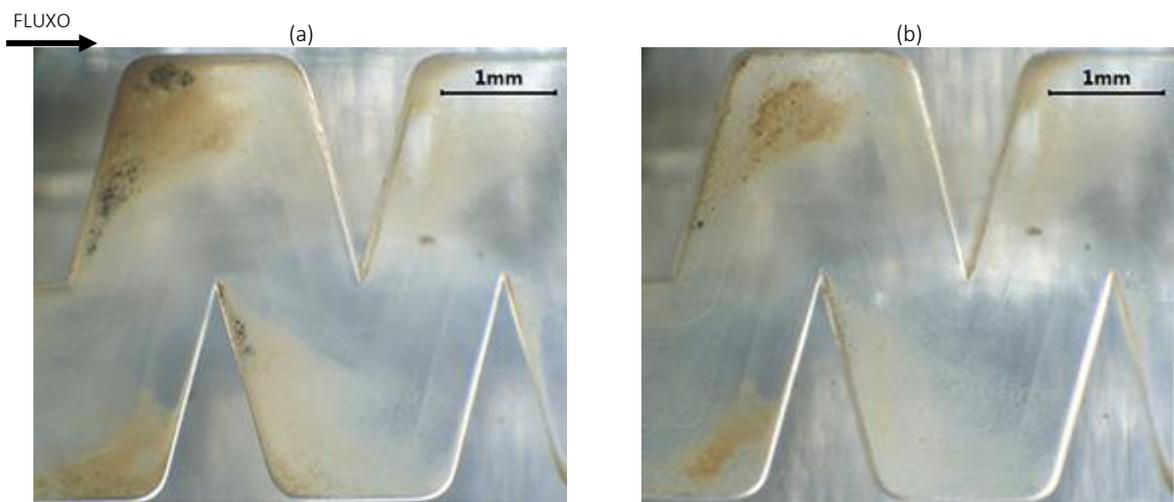


Figura 64. Deposição de partículas no início do labirinto com largura de canal de 1,3 mm e relação H/W de 1,6 antes (a) e depois (b) de iniciar os testes de 240 h

5. CONCLUSÕES

Para os emissores estudados, o campo de velocidade e a distribuição das linhas de corrente foram significativamente afetados pelo ângulo do defletor nos emissores EU, enquanto que a velocidade de escoamento e o tamanho dos vórtices nos emissores EV aumentaram a medida que a altura dos defletores foi elevada.

Ampliações na largura dos canais resultaram em aumentos significativos no comprimento dos labirintos para ambos os grupos de protótipo estudados. Reduções no ângulo dos defletores dos emissores EU proporcionaram aumentos no comprimento dos labirintos e no expoente de fluxo, enquanto o aumento da razão entre a altura do defletor e a largura do canal resultou na redução do comprimento dos labirintos e do expoente de fluxo.

Os emissores projetados com características geométricas que favorecem a formação de vórtices bem desenvolvidos apresentaram desempenho hidráulico superior aos emissores que permitem escoamento com características mais uniformes no canal. A presença de vórtice nos labirintos permitiu a construção de emissores com canais mais curtos e ainda contribuem com a redução do expoente de fluxo do emissor, fazendo com que a vazão se torne menos sensível a variações na pressão de operação e na temperatura da água.

Em relação ao desempenho antiobstrução, todas as geometrias de emissores EU foram obstruídas por partículas relativamente grandes que ficaram presas no labirinto.

Para o grupo de emissores EV com largura de canal de 1,3 e 1,0 mm, tanto a formação de biofilme quanto a sedimentação de partículas coincidem com os locais de baixa velocidade de escoamento e de má formação dos vórtices, ocorrendo principalmente nas regiões localizadas no primeiro defletor do labirinto. Após o primeiro defletor as condições de escoamento nos labirintos estudados não favorecem o acúmulo de partículas de areia.

Observou-se que a seção do canal foi um fator limitante, sendo que para ambas as etapas, emissores com largura de canal inferior a 0,8 mm, foram obstruídos por partículas que apresentaram, em pelo menos uma de suas dimensões, tamanho superior ao do canal, ou por um conjunto de partículas relativamente grandes que formaram uma estrutura em arco. Por outro lado os emissores com largura de canal igual ou superior a 1,0 mm não foram sensíveis à obstrução, indicando que a adoção dos vórtices bem desenvolvidos nos labirintos é benéfica do ponto de vista do desempenho hidráulico e antiobstrução pois permite a construção de labirintos com canais mais largos, além de não permitirem a sedimentação de partículas ao longo do canal.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 9261: Agricultural irrigation equipment. Emitters and emitting pipe. Specification and test methods. São Paulo, 2006.
- ADACHI, T.; HASEGAWA, S. Transition of the flow in a symmetric channel with periodically expanded grooves. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n. 8, p. 2721–2729, 2006.
- ADIN, A.; SACKS, M. Dripper Clogging Factors in Wastewater Irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 117, n. 6, p. 813–826, 1991.
- ADIN, B. A.; ELIMELECH, M. Particle filtration for wastewater irrigation. , v. 115, n. 3, p. 474–487, 1989.
- AIT-MOUHEB, N.; SCHILLINGS, J.; AL-MUHAMMAD, J.; et al. Impact of hydrodynamics on clay particle deposition and biofilm development in a labyrinth-channel dripper. **Irrigation Science**, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2019.
- AL-MUHAMMAD, J.; TOMAS, S.; AIT-MOUHEB, N.; AMIELH, M.; ANSELMET, F. Micro-PIV characterization of the flow in a milli-labyrinth-channel used in drip irrigation. **Experiments in Fluids**, v. 59, n. 12, p. 181–182, 2018.
- AL-MUHAMMAD, J.; TOMAS, S.; ANSELMET, F. Modeling a weak turbulent flow in a narrow and wavy channel: case of micro-irrigation. **Irrigation Science**, v. 34, n. 5, p. 361–377, 2016.
- ARAUJO, A. C. S. **Desempenho hidráulico de fitas gotejadoras operando sob diferentes temperaturas da água**. 2019. Dissertação (Mestrado) - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- BATES, D. M.; WATTS, D. G. **Nonlinear regression analysis and its applications**. Wiley, 1988.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.
- BORSSOI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; REISDÖRFER, M.; HERNÁNDEZ, R. H.; FOLLADOR, F. A. C. Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 4, p. 718–726, 2012.
- BOUNOUA, S. **Etude du colmatage DES SYSTEMES D ' IRRIGATION LOCALISEE**, 2010. UNIVERSITE DE PROVENCE AIX-MARSEILLE I.
- BOUNOUA, S.; TOMAS, S.; LABILLE, J.; et al. Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in- lab and numerical approaches. **Irrig Sci**, v. 34, p. 327–342, 2016.
- BRALTS, V. F.; WU, I. P.; GITLIN, H. M. Drip irrigation uniformity considering emitter plugging. **Transactions of the ASABE**, v. 24, n. 5, p. 1234–1240, 1981.
- BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R. G. TRICKLE IRRIGATION WATER QUALITY AND PREVENTIVE MAIN- TENANCE. **Agricultural Water Management**, v. 2, p. 149–162, 1979.
- DE CAMARGO, A. P.; MOLLE, B.; TOMAS, S.; FRIZZONE, J. A. Assessment of clogging effects on lateral hydraulics: Proposing a monitoring and detection protocol. **Irrigation Science**, v. 32, n. 3, p. 181–191, 2014.

- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Water Quality and Distribution Uniformity in Drip/Trickle Irrigation Systems. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 70, n. 4, p. 355–365, 1998. .
- CARARO, D. C.; BOTREL, T. A.; HILLS, D. J.; LEVERENZ, H. L. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n. 2, p. 251–257, 2006.
- CARMO, D. L. DO; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1211–1220, 2012.
- CELIK, H. K.; KARAYEL, D.; CAGLAYAN, N.; RENNIE, A. E. W.; AKINCI, I. Rapid prototyping and flow simulation applications in design of agricultural irrigation equipment: Case study for a sample in-line drip emitter. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 6, n. 1, p. 47–56, 2011.
- CHATTERJEE, S.; SIMONOFF, J. **Handbook of Regression Analysis**. [s.l.] Wiley, 2013.
- DAZHUANG, Y.; PEILING, Y.; SHUMEI, R.; YUNKAI, L.; TINGWU, X. Numerical study on flow property in dentate path of drip emitters. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 50, n. 5, p. 705–712, 2007.
- DRESSAIRE, E.; SAURET, A. Clogging of microfluidic systems. **Soft Matter**, v. 13, n. 1, p. 37–48, 2017.
- FARIA, L. DO AMARAL. **Proposta de Norma Técnica de Ensaio para Tubogotejadores de Irrigação: Resistência ao Entupimento por Particulados Sólidos em Suspensão**, 2013. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- FENG, J.; LI, Y.; WANG, W.; XUE, S. Effect of optimization forms of flow path on emitter hydraulic and anti-clogging performance in drip irrigation system. **Irrigation Science**, v. 36, n. 1, p. 37–47, 2017. Springer Berlin Heidelberg.
- FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. 1º ed. Maringá: Eduem, 2012.
- GAMRI, S.; SORIC, A.; TOMAS, S. S.; MOLLE, B.; ROCHE, N. Biofilm development in micro-irrigation emitters for wastewater reuse. **Irrigation Science**, v. 32, n. 1, p. 77–85, 2014.
- GILBERT, R. G.; NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A.; FRENCH, O. F.; ADAMSON, K. C. Trickle irrigation: Emitter clogging and other flow problems. **Agricultural Water Management**, v. 3, n. 3, p. 159–178, 1981.
- GOUIDER, M.; BOUZID, J.; SAYADI, S.; MONTIEL, A. Impact of orthophosphate addition on biofilm development in drinking water distribution systems. **Journal of Hazardous Materials**, v. 167, p. 1198–1202, 2009.
- HAOSU, S.; YUNKAI, L.; JI, F.; LIU, H.; LIU, Y. Effects of flow path boundary optimizations on particle transport in drip irrigation emitters. **Irrigation and Drainage**, v. 65, n. 4, p. 417–425, 2016.
- HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 2003. 494 p.
- HORN, H.; REIFF, H.; MORGENROTH, E. Simulation of growth and detachment in biofilm systems under defined hydrodynamic conditions. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 81, n. 5, p. 607–617, 2003.

- JUN, Z.; WANHUA, Z.; YIPING, T.; ZHENGYING, W.; BINGHENG, L. Numerical investigation of the clogging mechanism in labyrinth channel of the emitter. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 70, n. 13, p. 1598–1612, 2007.
- KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation Design Parameters. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 17, n. 4, p. 678–684, 1974.
- LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production: design, operation and management**. Elsevier, 2007.
- LAVANHOLI, R. **Avaliação de procedimento de ensaio para determinação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas sólidas**, 2016. Dissertação de mestrado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP).
- LAVANHOLI, R.; OLIVEIRA, F. C.; CAMARGO, A. P. D.; et al. Methodology to Evaluate Dripper Sensitivity to Clogging due to Solid Particles: An Assessment. **Scientific World Journal**, v. 2018, p. 1–9, 2018.
- LI, G. B.; LI, Y. K.; XU, T. W.; et al. Effects of average velocity on the growth and surface topography of biofilms attached to the reclaimed wastewater drip irrigation system laterals. **Irrigation Science**, 2012a.
- LI, G. Y.; WANG, J. D.; ALAM, M.; ZHAO, Y. F.; et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 3, p. 637–643, 2006.
- LI, Y. K.; LIU, Y. Z.; LI, G. B.; et al. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters. **Irrigation Science**, v. 30, n. 1, p. 43–56, 2012b.
- LI, Y.; YANG, P.; REN, S.; XU, T. Hydraulic Characterizations of Tortuous Flow in Path Drip Irrigation Emitter. **Journal of Hydrodynamics, Ser. B**, v. 18, n. 4, p. 449–457, 2006.
- LIU, Z.; XIAO, Y.; LI, Y.; et al. Influence of operating pressure on emitter anti-clogging performance of drip irrigation system with high-sediment water. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 174–184, 2019.
- MOSTAFA, H.; SULTAN, W. Hydraulic evaluation of locally modified emitter under laboratory conditions. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 67, n. 3, p. 291–296, 2018.
- NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. **Irrigation Science**, v. 12, n. 4, p. 187–192, 1991.
- NISHIMURA, T.; MURAKAMI, S.; ARAKAWA, S.; KAWAMURA, Y. Flow observations and mass transfer characteristics in symmetrical wavy-walled channels at moderate Reynolds numbers for steady flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 33, n. 5, p. 835–845, 1990.
- NIU, W.; LIU, L.; CHEN, X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. **Irrigation Science**, 2013.
- OLIVEIRA, F. C. DE. **Processo de obstrução causado por partículas de argila em suspensão**, 2017. Tese de doutorado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP).

- OLIVEIRA, F. C.; LAVANHOLI, R.; CAMARGO, A. ; et al. Influence of Concentration and Type of Clay Particles on Dripper Clogging. **Irrigation & Drainage Systems Engineering**, v. 06, n. 01, p. 1–5, 2017.
- PALAU SALVADOR, G.; ARVIZA VALVERDE, J.; BRALTS, V. F. Hydraulic Flow Behaviour through an In-line Emitter Labyrinth using CFD Techniques. An ASAE/CSAE Meeting Presentation. **Anais...** . p.8, 2004. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- PERBONI, A.; FRIZZONE, J. A.; CAMARGO, A. P. DE; PINTO, M. F. Modelling head loss along emitting pipes using dimensional analysis. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 35, n. 3, p. 442–457, 2015.
- PERBONI, A.; FRIZZONE, J. A.; COELHO, R. D.; LAVANHOLI, R.; SARETTA, E. Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia. **IRRIGA**, v. 23, n. 2, p. 194, 2018.
- PINTO, M. F.; CAMARGO, A. P.; ALMEIDA, A. C. S.; ALVES, D. G.; BOTREL, T. A. Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para microirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 211–217, 2011.
- PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. 3. ed. Madrid: Mundi Prensa, 1996. 513 p.
- PUIG-BARGUÉS, J.; LAMM, F.; TROOIEN, T.; CLARK, G. Effect of dripline flushing on subsurface drip irrigation systems. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 1, p. 147–155, 2010.
- QIAN, J.; HORN, H.; TARCHITZKY, J.; et al. Water quality and daily temperature cycle affect biofilm formation in drip irrigation devices revealed by optical coherence tomography. **Biofouling**, v. 33, n. 3, p. 211–221, 2017.
- QINGSONG, W.; GANG, L.; JIE, L.; et al. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 63, n. 2, p. 294–303, 2008.
- REYNOLDS, O. On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 186, p. 123–164, 1895.
- RODRÍGUEZ-SINOBAS, L.; JUANA, L.; LOSADA, A. Effects of Temperature Changes on Emitter Discharge. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 125, n. 2, p. 64–73, 1999.
- SEBER, G. A. F.; LEE, A. J. **Linear Regression Analysis**. 2nd ed. Wiley, 2003.
- TAYLOR, H. D.; BASTOS, R. K. X.; PEARSON, H. W.; MARA, D. D. Drip irrigation with waste stabilisation pond effluents: Solving the problem of emitter fouling. *Water Science and Technology*. **Anais...** , 1995.
- THILL, A.; MOUSTIER, S.; AZIZ, J.; WIESNER, M. R.; BOTTERO, J. Y. Flocs Restructuring during Aggregation: Experimental Evidence and Numerical Simulation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 243, n. 1, p. 171–182, 2001.
- VEKARIYA, P. B.; SUBBAIAH, R.; MASHRU, H. H. Hydraulics of microtube emitters: A dimensional analysis approach. **Irrigation Science**, v. 29, n. 4, p. 341–350, 2011.

- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method**. edition 2 ed. 2007.
- VILAÇA, F. N.; DE CAMARGO, A. P.; FRIZZONE, J. A.; MATEOS, L.; KOECH, R. Minor losses in start connectors of microirrigation laterals. **Irrigation Science**, v. 35, n. 3, 2017.
- WEI, Q.; SHI, Y.; DONG, W.; LU, G.; HUANG, S. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics. **Agricultural Water Management**, v. 84, n. 1-2, p. 130–136, 2006.
- WEI, Q.; SHI, Y.; LU, G.; DONG, W.; HUANG, S. Rapid Evaluations of Anticlogging Performance of Drip Emitters by Laboratorial Short-Cycle Tests. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 134, n. 3, p. 298–304, 2008.
- WEI, Z.; CAO, M.; LIU, X.; TANG, Y.; LU, B. Flow behaviour analysis and experimental investigation for emitter micro-channels. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 25, n. 4, p. 729–737, 2012.
- WEI, Z.; TANG, Y.; ZHAO, W.; LU, B. Rapid structural design of drip irrigation emitters based on RP technology. **Rapid Prototyping Journal**, v. 13, n. 5, p. 268–275, 2007.
- WU, D.; LI, Y.; LIU, H.; et al. Simulation of the flow characteristics of a drip irrigation emitter with large eddy methods. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 58, n. 3-4, p. 497–506, 2013.
- WU, I. P. An assessment of hydraulic design of micro-irrigation systems. **Agricultural Water Management**, v. 32, n. 3, p. 275–284, 1997.
- WU, W. Y.; HUANG, Y.; LIU, H. L.; YIN, S. Y.; NIU, Y. Reclaimed Water Filtration Efficiency and Drip Irrigation Emitter Performance with Different Combinations of Sand and Disc Filters. **Irrigation and Drainage**, v. 64, n. 3, p. 362–369, 2015.
- YU, L.; LI, N.; LIU, X.; et al. Influence of Dentation Angle of Labyrinth Channel of Drip Emitters on Hydraulic and Anti-Clogging Performance. **Irrigation and Drainage**, v. 67, n. 2, p. 191–198, 2018a.
- YU, L.; LI, N.; LONG, J.; LIU, X.; YANG, Q. The mechanism of emitter clogging analyzed by CFD–DEM simulation and PTV experiment. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2018b.
- YU, L.; LI, N.; YANG, Q.; LIU, X. Influence of Flushing Pressure before Irrigation on the Anti-Clogging Performance of Labyrinth Channel Emitters. **Irrigation and Drainage**, v. 67, n. 2, p. 191–198, 2018c.
- ZHANG, J.; ZHAO, W.; LU, B. Rapid Prediction of Hydraulic Performance for Emitters with Labyrinth Channels. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. May, p. 414–418, 2013.
- ZHANG, J.; ZHAO, W.; TANG, Y.; LU, B. Anti-clogging performance evaluation and parameterized design of emitters with labyrinth channels. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 74, n. 1, p. 59–65, 2010.
- ZHANG, J.; ZHAO, W.; TANG, Y.; LU, B. Structural optimization of labyrinth-channel emitters based on hydraulic and anti-clogging performances. **Irrigation Science**, v. 29, n. 5, p. 351–357, 2011.
- ZHANG, J.; ZHAO, W.; WEI, Z.; TANG, Y.; LU, B. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 120–129, 2007.
- ZHANG, L.; WU, P. TE; ZHU, D. L.; ZHENG, C. Flow regime and head loss in a drip emitter equipped with a labyrinth channel. **Journal of Hydrodynamics**, v. 28, n. 4, p. 610–616, 2016.

ZHANG, L.; WU, P.; ZHU, D.; ZHENG, C. Effect of pulsating pressure on labyrinth emitter clogging. **Irrigation Science**, v. 35, n. 4, p. 267–274, 2017.

ZHANGZHONG, L.; YANG, P.; REN, S.; LIU, Y.; LI, Y. Flow Characteristics and Pressure-Compensating Mechanism of Non-Pressure-Compensating Drip Irrigation Emitters. **Irrigation and Drainage**, v. 64, n. 5, p. 637–646, 2015.

ZITTERELL, D. B.; FRIZZONE, J. A.; RETTORE NETO, O. Dimensional analysis approach to estimate local head losses in microirrigation connectors. **Irrigation Science**, v. 32, n. 3, p. 169–179, 2014.

APÊNDICE

GRUPO DO EMISSOR: EV		W: 1,3 mm		H/W: 1,0	
LEITURA	REPETIÇÃO 1		REPETIÇÃO 2		T (°C)
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	
Inicial	14,3	23,0	35,84	24,7	
1	22,3	25,6	47,66	25,8	
2	22,7	25,9	49,85	26,0	
3	22,94	25,1	49,68	27,0	
4	23,06	26,7	49,62	26,8	
5	23,35	26,9	53,22	25,9	

GRUPO DO EMISSOR: EV		W: 1,3 mm		H/W: 1,2	
LEITURA	REPETIÇÃO 1		REPETIÇÃO 2		T (°C)
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	
Inicial	14,3	23,0	35,84	24,7	
1	22,3	25,6	47,66	25,8	
2	22,7	25,9	49,85	26,0	
3	22,94	25,1	49,68	27,0	
4	23,06	26,7	49,62	26,8	
5	23,35	26,9	53,22	25,9	

GRUPO DO EMISSOR: EV		W: 1,3 mm		H/W: 1,4	
LEITURA	REPETIÇÃO 1		REPETIÇÃO 2		T (°C)
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	
Inicial	22,0	22,1	35,84	24,7	
1	28,80	25,8	47,66	25,8	
2	29,38	25,6	49,85	26,0	
3	30,23	26,5	49,68	27,0	
4	31,80	26,7	49,62	26,8	
5	32,09	27,2	53,22	25,9	

GRUPO DO EMISSOR: EV		W: 1,3 mm		H/W: 1,6	
LEITURA	REPETIÇÃO 1		REPETIÇÃO 2		T (°C)
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	
Inicial	14,46	22,1	66,90	23,8	
1	29,83	24,4	75,28	26,0	
2	30,38	25,8	80,79	25,6	
3	31,11	26,9	84,23	25,5	
4	31,82	25,5	78,67	25,3	
5	32,59	26,1	80,29	25,4	

GRUPO DO EMISSOR: EV		W: 1,0 mm		H/W: 1,0	
LEITURA	REPETIÇÃO 1		REPETIÇÃO 2		T (°C)
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	
Inicial	14,15	24,8	64,70	24,0	
1	22,13	26,5	75,28	26,0	
2	23,71	26,3	80,79	25,6	
3	23,46	27,0	84,23	25,5	
4	24,30	26,4	78,67	25,3	
5	24,74	25,0	80,29	25,4	

GRUPO DO EMISSOR: EV		W: 1,0 mm		H/W: 1,2	
LEITURA	REPETIÇÃO 1		REPETIÇÃO 2		T (°C)
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	
Inicial	14,15	24,8	64,70	24,0	
1	22,13	26,5	75,28	26,0	
2	23,71	26,3	80,79	25,6	
3	23,46	27,0	84,23	25,5	
4	24,30	26,4	78,67	25,3	
5	24,74	25,0	80,29	25,4	

GRUPO DO EMISSOR: EV		W: 1,0 mm		H/W: 1,4	
LEITURA	REPETIÇÃO 1		REPETIÇÃO 2		T (°C)
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	
Inicial	14,46	22,1	64,70	24,0	
1	29,83	24,4	75,28	26,0	
2	30,38	25,8	80,79	25,6	
3	31,11	26,9	84,23	25,5	
4	31,82	25,5	78,67	25,3	
5	32,59	26,1	80,29	25,4	

GRUPO DO EMISSOR: EV		W: 1,0 mm		H/W: 1,6	
LEITURA	REPETIÇÃO 1		REPETIÇÃO 2		T (°C)
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	
Inicial	14,46	22,1	66,90	23,8	
1	29,83	24,4	75,28	26,0	
2	30,38	25,8	80,79	25,6	
3	31,11	26,9	84,23	25,5	
4	31,82	25,5	78,67	25,3	
5	32,59	26,1	80,29	25,4	

GRUPO DO EMISSOR: EV (ensaio prolongado)		W: 1,0 e 1,3 mm		H/W: 1,6	
LEITURA	REPETIÇÃO 1		CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)	
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	T (°C)			
Inicial		14,46		22,1	
1		29,83		24,4	
2		30,38		25,8	
3		31,11		26,9	
4		31,82		25,5	
5		32,59		26,1	
6		32,94		27,7	
7		31,91		25,5	
8		33,91		26,5	
9		33,48		26,3	
10		32,79		26,8	
11		33,18		27,1	
12		23,57		26,9	
13		33,82		27,0	
14		34,30		26,3	
15		34,64		26,4	
16		34,25		25,6	
17		35,21		26,4	
18		34,93		28,0	
19		35,15		26,6	
20		35,87		26,5	
21		35,33		27,0	
22		35,42		27,4	
23		36,28		28,1	
24		36,23		27,8	
25		39,14		26,4	
26		36,42		27,0	
27		36,92		27,6	
28		37,19		28,6	
29		37,61		28,1	
30		37,14		28,6	