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

Contribuição ao protocolo de normatização de ensaios para a avaliação da
sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas

Diego José de Sousa Pereira

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

Diego José de Sousa Pereira
Engenheiro Agrícola e Ambiental

Contribuição ao protocolo de normatização de ensaios para a avaliação da sensibilidade
de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Dissertação apresentada para obtenção do título
de Mestre em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

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

Pereira, Diego José de Sousa

Contribuição ao protocolo de normatização de ensaios para a avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas / Diego José de Sousa Pereira. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

53 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Deposição de partículas 2. Entupimento 3. Microirrigação 4. Qualidade da água I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, **José Donizeth** e **Silvana Moura**,
por todo apoio e dedicação.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pela fé, saúde e oportunidades oferecidas.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade. A todos professores e funcionários desta instituição, que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse trabalho.

Ao meu orientador, José Antônio Frizzzone, pela amizade, dedicação e instruções durante a realização do trabalho.

Aos membros da banca de qualificação, Antonio Pires de Camargo, Rubens Duarte e Sérgio Nascimento, pelas contribuições no trabalho.

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

Aos meus pais, José Donizeth e Silvana Moura, pela dedicação e apoio durante minha vida, proporcionando o suporte necessário para completar mais essa etapa.

À minha irmã Gabrielle, pela amizade e companheirismo durante toda a vida.

À equipe do LEMI, Ana Sátiro, Fabrício Oliveira, Luiz Sobenko, Marcus Talamini, Rogério Lavanholi, Verônica Melo e Wagner Bombardelli, pelo auxílio durante esse trabalho e pela amizade.

A todos colegas de curso, pelo apoio e momentos de descontração ao longo dessa jornada.

Muito obrigado!

SÚMARIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	9
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1. Irrigação por gotejamento.....	13
2.2. Obstrução dos gotejadores.....	13
2.3. Obstrução por partículas sólidas.....	15
2.4. Comportamento hidráulico e de partículas sólidas nos labirintos	16
2.5. Procedimentos de ensaio de obstrução de gotejadores por partículas sólidas.....	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1. Modelos de gotejadores avaliados.....	21
3.2. Bancada de ensaios.....	23
3.3. Ensaio de obstrução.....	25
3.4. Preparo das partículas sólidas utilizadas no ensaio de obstrução	25
3.5. Rotina de ensaio	27
3.6. Análise de sensibilidade dos emissores à obstrução.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Ensaio Preliminares	31
4.2. Ensaio definitivos.....	33
4.2.1. Características da água de ensaio	33
4.2.2. Obstrução dos gotejadores.....	35
4.2.3. Processos e posição da obstrução nos labirintos	39
4.3. Recomendações para melhoria do protocolo de ensaios	45
5. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	49

RESUMO

Contribuição ao protocolo de normatização de ensaios para a avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas

A obstrução dos emissores é apontada como o principal problema da irrigação por gotejamento, sendo a obstrução por agentes físicos a mais observada. No mercado, existem diversos modelos de emissores, sendo que a sensibilidade à obstrução varia conforme a qualidade da água e a geometria interna do emissor. Nesse contexto, o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da susceptibilidade de emissores à obstrução é importante para a identificação de modelos de emissores menos sensíveis à obstrução. A norma ISO/DTR 21540 (em desenvolvimento) especifica métodos de laboratório e de campo para a avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas. O objetivo dessa pesquisa foi identificar limitações e propor aprimoramentos na etapa de ensaios de laboratório da ISO/DTR 21540, visando melhorar a repetitividade dos resultados e contribuir para a obtenção de uma metodologia mais robusta e confiável. Além disso, para a compreensão dos processos de obstrução por partículas sólidas, buscou-se analisar as principais causas e regiões de deposição de partículas ao longo dos labirintos dos emissores. Foram avaliados dois modelos de emissores (Taldrip 0,55 L h⁻¹ e Drip-Tech 1,55 L h⁻¹). O material utilizado como agente causador de obstrução foi um composto de partículas sólidas preparadas a partir de solo natural conforme requisitos da norma ISO 11277. O ensaio de obstrução consistiu de quatro fases, com duração de 40 horas cada, em uma combinação entre faixas granulométricas (0-75, 75-125; 125-212 e 212-500 µm) e concentração de partículas (125, 250, 375 e 500 mg L⁻¹), com o aumento do risco de obstrução a cada fase. Essa pesquisa permitiu identificar limitações e enunciar recomendações para melhoria do protocolo de ensaios em discussão na ISO/DTR 21540. O acúmulo de partículas com dimensões relativamente grande (> 125 µm) foi a principal causa de obstrução, reforçando a probabilidade de que a granulometria de partículas é um fator dominante nos processos de obstrução quando se usa esse protocolo de ensaios.

Palavras-chave: Deposição de partículas; Entupimento; Microirrigação; Qualidade da água

ABSTRACT

Contribution to a standardized test protocol for assessing the sensitivity of drippers to clogging due to solid particles

Clogging of emitters is pointed out as the main problem of drip irrigation, being the clogging by physical agents the most observed. In the market, there are several models of emitters, and the sensitivity to the clogging varies according to the water quality and the internal geometry of the emitter. In this context, the development of a methodology that evaluates the susceptibility of emitters to clogging is important, once that it can identify less sensitive emitter models to clogging. The standard ISO / DTR 21540 (under development) specifies laboratory and field methods for assessing the sensitivity of drippers to clogging caused by solid particles. The aim of this research was to identify limitations and propose improvements in the ISO / DTR 21540 laboratory test stage, in order to improve the repeatability of the results and contribute to a more robust and reliable methodology. In addition, to understand the solid particle clogging processes, were analyzed the main causes and regions of particle deposition along the labyrinths of the emitters. Two emitter models (Taldrip 0.55 L h⁻¹ and Drip-Tech 1.55 L h⁻¹) were evaluated. The material used as clogging agent was solid particles compound prepared from natural soil according to the ISO 11277 requirements. The clogging test consisted of four stages, lasting 40 hours each, in a combination of granulometric range (0-75, 75-125, 125-212 and 212-500 µm) and particle concentration (125, 250, 375 and 500 mg L⁻¹), with higher risk of clogging at each stage. This research allowed to identify limitations and enunciate recommendations for improvement of the test protocol under discussion in ISO / DTR 21540. The accumulation of particles with relatively large dimensions (> 125 µm) was the main cause of clogging, reinforcing the probability that the grain size particle is a dominant factor in the clogging processes when using this test protocol.

Keywords: Clogging; Particle deposition; Microirrigation; Water quality

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Regiões distintas de escoamento no interior do labirinto (JUN et al., 2007).	17
Figura 2. Características geométricas dos emissores avaliados a) Taldrip b) Drip-Tech	22
Figura 3. Pré-filtro dos emissores avaliados a) Taldrip b) Drip-Tech	22
Figura 4. Esquema da bancada de ensaios de obstrução de gotejadores.....	23
Figura 5. Número de emissores obstruídos nas três repetições dos ensaios iniciais.....	31
Figura 6. Resíduos de tinta encontrados no interior dos labirintos do modelo Taldrip ao final da primeira repetição dos ensaios preliminares.	32
Figura 7. Temperatura da água de ensaio ao final de cada dia para as três repetições.	33
Figura 8. Valores de ph ao final de cada dia de ensaio para as três repetições.....	34
Figura 9. Condutividade elétrica da água ao final de cada dia de ensaio para as três repetições.	34
Figura 10. Número de emissores obstruídos para os modelos a) Taldrip e b) Drip-Tech	36
Figura 11. Partículas de dimensões superiores às partículas de ensaio.	37
Figura 12. Comparação entre o nível de obstrução com os resultados obtidos por Lavanholi (2016) para os modelos a) Taldrip e b) Drip-Tech.	39
Figura 13. Processos de obstrução observados em cada repetição do ensaio.	40
Figura 14. Obstrução por acúmulo de areia para o emissor Taldrip	41
Figura 15. Obstrução causada pela formação de aglomerados de partículas finas para o modelo Taldrip.....	41
Figura 16. Obstrução causada pela presença de contaminantes a) filamento de raiz e b) fragmentos de ferro.	42
Figura 17. Posição no labirinto do início de deposição de partículas.	43
Figura 18. Locais de deposição de partículas ao longo do labirinto a) no início com acúmulo de partículas de areia; b) no início com formação de agregados; c) na região central e d) no fim.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características de procedimentos de ensaios de obstrução por partículas sólidas....	20
Tabela 2. Características hidráulicas dos emissores.....	21
Tabela 3. Distribuição da concentração das faixas granulométricas em cada fase.	25
Tabela 4. Faixas granulométricas a serem utilizadas no experimento para cada fase do ensaio.	27

1. INTRODUÇÃO

A obstrução dos gotejadores é indicada como um fator limitante à adoção de sistemas de irrigação por gotejamento, visto que reduz o desempenho e a vida útil do sistema no campo. Esse processo é influenciado por fatores físicos, químicos e biológicos, relacionados à qualidade da água de irrigação, os quais podem atuar de forma isolada ou simultânea. No entanto, ainda é difícil compreender plenamente como cada um dos componentes influenciam no processo. A obstrução por fatores físicos, decorrente da existência de partículas suspensas na água de irrigação, é a mais frequente e, conseqüentemente, a mais estudada.

No mercado, existem diversos modelos de emissores, sendo que a sensibilidade à obstrução varia conforme a qualidade da água e a geometria interna do emissor. Portanto, o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da susceptibilidade de emissores à obstrução é importante para a identificação de modelos de emissores menos sensíveis à obstrução.

Um procedimento adequado para ensaios em laboratório deve incluir os fatores predominantes no processo de obstrução, além de propiciar a obtenção de adequados índices de repetitividade e reprodutibilidade, garantindo que um mesmo modelo de emissor apresente resultados similares, mesmo quando avaliado por laboratórios distintos. Para que um procedimento se torne um protocolo de ensaio apropriado, o mesmo deve conter fatores e níveis que apresentem fundamentação teórica indicando o que realmente interfere no processo de obstrução, de forma que os resultados apresentem qualidade e confiabilidade.

Desde 2013 a equipe do Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação (LEMI/ESALQ/USP) vem colaborando com a execução de pesquisas que visam dar suporte ao desenvolvimento de uma norma técnica para a avaliação da sensibilidade de emissores à obstrução causada por partículas sólidas. Sob liderança do Laboratório PRESTI (IRSTEA), a proposta de norma ISO/DTR 21540 foi registrada no comitê ISO/TC 23/SC 18 em junho de 2016 e está sob avaliação. A proposta especifica métodos para a avaliação de gotejadores em condições de laboratório e em campo. Devido à complexidade dos processos de obstrução e as divergências de opiniões no comitê da ISO, evidenciou-se a necessidade da busca por fundamentos teóricos para dar suporte à definição de requisitos e procedimentos de ensaio da futura norma técnica.

Lavanholi (2016) realizou estudo para avaliar o protocolo de ensaios sugerido pela norma, a fim de contribuir com a validação da metodologia e colaborar com resultados científicos que amparem o procedimento normatizado de ensaio. No entanto, para modelos de emissores mais sensíveis à obstrução, evidenciou-se variabilidade excessiva nos resultados de sucessivos

ensaios. Tal fato permite supor que houve variação significativa de fatores importantes e que interferem nos processos de obstrução entre sucessivos ensaios. Talvez, se tais fatores fossem identificados e controlados seria possível obter resultados com menor variabilidade e, portanto, mais consistentes. Consequentemente, recomendações de melhoria na metodologia de ensaios poderiam ser apresentadas ao comitê da ISO.

Baseando-se na discussão e conclusões apresentadas por Lavanholi (2016), a hipótese desse trabalho é que a repetitividade dos resultados de ensaios de obstrução utilizando a metodologia do Laboratório PReSTI/IRSTEA pode ser melhorada padronizando-se características da água utilizada nos ensaios; implementando-se ações para minimizar a interferência de agentes químicos e biológicos de obstrução, e ainda, adotando-se medidas para minimizar a recirculação de contaminantes (partículas externas) no circuito hidráulico da bancada de ensaios.

Nesse contexto, o principal objetivo dessa pesquisa foi identificar limitações e propor aprimoramentos no protocolo de ensaio da ISO/DTR 21540, visando melhorar a repetitividade dos resultados, tornando-o mais robusto e confiável. Além disso, para a compreensão dos processos de obstrução por partículas sólidas, buscou-se analisar as principais causas e regiões de deposição de partículas ao longo dos labirintos dos emissores.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação por gotejamento

A irrigação por gotejamento consiste na aplicação de água de forma localizada, em pequeno volume, porém com alta frequência, na fração do solo onde há maior concentração das raízes, sendo em pontos discretos ou em faixa contínua, mantendo assim a umidade do solo próxima à capacidade de campo (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006; FRIZZONE et al., 2012).

Esse sistema se destaca por apresentar alta eficiência energética e de aplicação, elevada uniformidade de distribuição de água, além da possibilidade de fertirrigação (HOFFMAN; MARTIN, 1993; AYARS et al., 2007). Por outro lado, o custo de aquisição e manutenção do sistema, assim como o risco de obstrução dos gotejadores, apresentam-se como desvantagens desse sistema (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979).

Os emissores são os principais componentes da irrigação por gotejamento, pois são os dispositivos utilizados para dissipar energia, a fim de proporcionar baixa vazão e boa uniformidade de aplicação (ZHENG YING et al., 2012). Nos emissores, a água é conduzida através de pequenos labirintos, que geralmente apresentam passagens de pequena dimensões, o que facilita a obstrução. Diante dessa característica, a qualidade da água é um fator limitante no bom desempenho dos emissores (NAKAYAMA; BUCKS, 1991). A obstrução de um emissor pode ser parcial ou completa. Em ambos os casos, a obstrução reduz a uniformidade de distribuição do sistema (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979; CAPRA; SCICOLONE, 1998) fazendo com que o mesmo não atinja o desempenho desejado.

2.2. Obstrução dos gotejadores

A obstrução de gotejadores tem sido apontada como um dos principais problemas do sistema de irrigação por gotejamento, sendo influenciada pela qualidade da água de irrigação (CAPRA; SCICOLONE, 1998; PINTO et al., 2017) e pela geometria interna dos emissores (ZHANG et al., 2011; PATIL; NIMBALKAR; JOSHI, 2013; ZHOU et al., 2017). O problema de obstrução tem como origem a ação individual ou combinada de agentes de natureza física, química ou biológica (GILBERT; NAKAYAMA; BUCKS, 1979). Uma análise de qualidade da água pode indicar quais medidas preventivas devem ser tomadas, diminuindo o risco de obstrução (AYARS et al., 2007).

A ação de agentes de natureza biológica ocorre devido ao desenvolvimento de microrganismos, como algas, fungos e bactérias no interior do sistema de irrigação. Na maioria das vezes, esses microrganismos não são retidos pelo sistema de filtragem, desenvolvendo-se e formando colônias (ADIN; SACKS, 1991). Obstruções desta natureza são mais frequentes quando a água apresenta elevada carga orgânica ou grande quantidade de nutrientes, como é o caso da utilização da água de reuso na irrigação que vem se tornando comum (BATISTA et al., 2014; GAMRI et al., 2014). Juntamente com essa prática, a adoção de medidas preventivas e controle do desenvolvimento do biofilme devem estar presentes no sistema de irrigação.

Como forma de evitar esse tipo de problema, a cloração da água é o principal método adotado para o controle da população de microrganismos (GILBERT et al., 1981; RAVINA et al., 1992). Durante o processo de cloração, a concentração de cloro livre presente na água define a eficiência do procedimento, pois este é o responsável por eliminar os microrganismos. A literatura dispõe de diferentes recomendações de concentração de cloro livre, tempo de contato e forma de aplicação (contínua ou pontual) para um tratamento eficaz (CHAUHDARY et al., 2015; SONG et al., 2017).

A obstrução de natureza química é resultado da precipitação de íons, formando incrustações que podem bloquear a passagem de água no interior do emissor. Os principais precipitados encontrados na microirrigação são os compostos por ferro, manganês e cálcio, destacando-se o carbonato de cálcio (LILI et al., 2016; ZHANGZHONG et al., 2018), que tem sua precipitação favorecida pelo aumento de temperatura, observada no fim das linhas laterais. São diversos os fatores que condicionam a precipitação de íons, sendo o pH da água apontado como o fator de maior relevância. 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 (HILLS; NAWAR; WALLER, 1989; NAKAYAMA; BOMAN; PITTS, 2007).

A obstrução por partículas sólidas em suspensão tem sido apontada como a mais comum entre os tipos de obstrução. Devido a pequenas seções dos labirintos dos emissores, geralmente inferiores a 1 mm² (RAVINA et al., 1992), a presença de partículas de origem inorgânicas ou orgânicas (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979), podem facilmente causar a obstrução.

A ação dos agentes causadores da obstrução (físico, químico e biológico) é agravada pelas dimensões e arranjo arquitetônico com que os labirintos são projetados (ADIN; SACKS, 1991). Além das características hidráulicas de dissipação de energia, deseja-se que o emissor seja pouco suscetível à obstrução. Atualmente, as pesquisas que envolvem o desenvolvimento de emissores menos susceptíveis à obstrução, trabalham com duas vertentes: (1) aumento da região

de fluxo principal, onde o escoamento apresenta velocidade relativamente alta; e (2) capacidade de autolimpeza através de zonas de formação de vórtices estrategicamente distribuídas ao longo do labirinto (FENG et al., 2018).

Apesar do conhecimento de diversas medidas preventivas e o desenvolvimento de emissores menos susceptíveis à obstrução, esse fenômeno ainda não foi entendido por completo. Dessa forma, o estudo de maneira individualizada desses fatores físicos, químicos e biológicos pode fornecer informações importantes para a proposta de soluções ao problema.

2.3. Obstrução por partículas sólidas

Problemas de obstrução por natureza física são ocasionados pela presença de partículas em suspensão na água de irrigação, as quais podem ser de origem inorgânica ou orgânica (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979). Tais materiais não são retidos pelo sistema de filtragem ou podem adentrar nas tubulações durante a montagem do sistema (PERBONI, 2016; AMARAL, 2017). Durante o funcionamento do sistema, as partículas sólidas atravessam o pré-filtro do emissor, podendo se alojar no interior do labirinto, provocando a obstrução.

Bucks, Nakayama e Gilbert (1979) propuseram uma classificação de risco de obstrução para a presença de sólidos suspensos na água de irrigação. Concentrações menores que 50 mg L⁻¹ apresentam baixo risco; entre 50 e 100 mg L⁻¹ apresentam risco moderado; e, acima de 100 mg L⁻¹ apresentam alto risco de obstrução. Outra classificação foi proposta por Capra & Scicolone (1998), sendo que valores de sólidos suspensos inferiores a 200 mg L⁻¹ apresentam pequeno risco; entre 200 e 400 mg L⁻¹ risco moderado; e, acima de 400 mg L⁻¹, alto risco de obstrução.

Os principais fatores que influenciam na obstrução por partículas em suspensão são a granulometria e a concentração das partículas (WEI et al., 2008; LAVANHOLI, 2016; OLIVEIRA, 2017). No entanto, é difícil assegurar qual dos dois fatores é dominante na obstrução dos emissores. A severidade da obstrução, em muitos casos, depende mais do diâmetro do que da quantidade de partículas na água de irrigação (ADIN; SACKS, 1991). Todavia, é possível que o aumento da concentração de partículas na água de irrigação, mesmo que de pequenos diâmetros (< 0,01 mm), ocasione efeito significativo na obstrução dos emissores (NIU; LIU; CHEN, 2013; BOUNOUA et al., 2016; OLIVEIRA, 2017).

A respeito da causa da obstrução de natureza física são observados três fenômenos. O mais recorrente é causado por partículas que apresentam dimensões superiores a seção de escoamento do emissor, causando entupimento rápido (PERBONI, 2016; TALAMINI JUNIOR, 2018). O segundo fenômeno é decorrente do acúmulo lento de partículas menores no interior

dos emissores e na tubulação, sendo que esse acúmulo geralmente ocorre em regiões onde a velocidade de escoamento é insuficiente para manter as partículas em suspensão (NIU; LIU; CHEN, 2013; LAVANHOLI, 2016). Há ainda, a obstrução provocada por processos de aglomeração de partículas finas (0 a 75 μm), em que um núcleo de aglomerados se forma em determinada região do labirinto e provoca o bloqueio completo do escoamento (LAVANHOLI, 2016). O acúmulo de partículas finas no sistema hidráulico ocorre em condições físico-químicas e hidrostáticas que favorecem o processo de agregação de partículas de pequeno diâmetro (THILL et al., 2001; BOUNOUA et al., 2016; OLIVEIRA, 2017). Fatores como concentração de sais e pH da solução facilitam a ocorrência deste processo. Em condições hidrodinâmicas, a turbulência se torna um fator condicionante na formação de agregados (THILL et al., 2001) devido ao choque mais frequente entre partículas sólidas.

A utilização de sistemas de filtragem é o método mais comum para evitar a entrada de material particulado no sistema de irrigação. No mercado estão disponíveis diferentes tipos de filtros, sendo que os mais utilizados na irrigação são os compostos pelos seguintes elementos filtrantes: areia, tela e disco (PINTO, 2013). A escolha do tipo de filtragem a ser utilizada depende da qualidade de água. Quanto maior a necessidade de remoção de contaminantes, mais caro será a aquisição e manutenção do sistema de filtragem (SÁNCHEZ et al., 2016).

Para as partículas de pequena dimensão, as quais atravessam o sistema de filtragem, a adoção do *flushing* é recomendada para a prevenção da obstrução de emissores. De acordo com Puig-Bargués et al., (2010) esse procedimento consiste na abertura do fim das linhas laterais, possibilitando a remoção de partículas por meio do fluxo de água. A duração e a frequência com que a prática é realizada, assim como as características do escoamento da água (vazão, pressão e velocidade) durante a execução, apresentam-se como fatores importantes para o sucesso dessa prática (PUIG-BARGUÉS; LAMM, 2013; FENG et al., 2017; YU et al., 2018b).

2.4. Comportamento hidráulico e de partículas sólidas nos labirintos

Nos labirintos normalmente são observadas duas regiões com características de escoamento distintas (Figura 1). A primeira, denominada como região do fluxo principal, fica localizada ao centro do labirinto e apresenta altas velocidades (1,4 à 3,2 m s^{-1}). A segunda região, afastada do centro e próxima as bordas das paredes do labirinto, apresenta velocidade menor, com valores de escoamento inferiores à 0,5 m s^{-1} (JUN et al., 2007; LIU et al., 2010).

Figura 1. Regiões distintas de escoamento no interior do labirinto (JUN et al., 2007).

A região de baixa de velocidade, também denominada região de vórtice é reconhecida pela formação de redemoinhos. Além de auxiliarem na dissipação da energia hidráulica, há evidências de que os vórtices oferecem ao emissor capacidade de autolimpeza do labirinto, evitando acúmulo de partículas próximo as paredes do canal (LIU et al., 2010).

Zhang et al. (2010) e Liu (2010) ainda apresentam uma terceira região, a de estagnação. Nessas regiões, apesar da velocidade não possuir valores inferiores à região de formação de vórtices, as partículas são capazes de se depositarem. As zonas de estagnação não favorecem a dissipação de energia e, não apresentam capacidade de limpeza, portanto devem ser minimizadas em um labirinto.

Outra análise importante está relacionada ao comportamento hidráulico na entrada e saída do emissor. Essas duas regiões apresentam baixa velocidade de escoamento, o que favorece a deposição de partículas (LIU et al., 2010). Na entrada do labirinto, a energia cinética turbulenta apresenta uma menor magnitude em relação ao restante do labirinto, tornando-se mais susceptíveis a deposição de partículas (AL-MUHAMMAD; TOMAS; ANSELMET, 2016; BOUNOUA et al., 2016).

Zhou et al. (2017) criaram um indicador de resistência à obstrução baseado nas características construtivas do labirinto do emissor avaliando o comprimento do labirinto e a razão entre largura e profundidade do canal. Segundo os autores, quanto menor o comprimento do labirinto e menor razão entre largura e profundidade, maior será a susceptibilidade à obstrução do emissor.

Nos estudos de Zhang et al. (2010) a taxa de passagem de partículas pelo canal dos labirintos não foi influenciada pela relação entre a altura do dente e largura do canal. No entanto, ângulo dos dentes, relação entre largura e profundidade do canal, e relação entre largura da crista e altura do dente apresentaram efeitos significativos na resistência à obstrução. Liu et al. (2010) foram além, e concluíram que quando essas regiões apresentam um ângulo próximo a 90°

favorecem a limpeza dos canais dos labirintos por meio da remoção de partículas pelos redemoinhos, que são capazes de se desenvolverem completamente, oferecendo maior velocidade de escoamento.

No que se refere ao comportamento das partículas ao longo da trajetória do labirinto, partículas de diâmetros menores, tendem a acompanhar o movimento do fluido e, conseqüentemente apresentar menos colisões com a parede do labirinto. No entanto, essas partículas quando comparadas a partículas de maiores dimensões, tendem a permanecer nas regiões de estagnação e se depositarem (JUN et al., 2007; LIU et al., 2016).

O comportamento de partículas de grande granulometria foi descrito por Liu et al. (2016) por meio da técnica DPIV (*Digital Particle Image Velocimetry*). Partículas com diâmetro de 50 μm quando próximas as paredes do labirinto apresentam velocidades menores do que partículas de 100 μm . No entanto, na região do fluxo principal, o comportamento dessas partículas é invertido, sendo que as partículas de 50 μm apresentam uma maior velocidade.

2.5. Procedimentos de ensaio de obstrução de gotejadores por partículas sólidas

Atualmente, não existe um método de ensaio normatizado para avaliar a sensibilidade dos gotejadores à obstrução, o que se deve principalmente, à complexidade do fenômeno. Diante dessa dificuldade, na tentativa de evidenciar os fatores dominantes no processo de obstrução, algumas pesquisas foram desenvolvidas com diferentes metodologias de ensaio, variando-se concentrações e diâmetros das partículas sólidas, duração de ensaio, número de repetições, tamanho amostral e posição do emissor (LI et al., 2006; WEI et al., 2008; FARIA, 2013; NIU; LIU; CHEN, 2013; BOUNOUA et al., 2016; OLIVEIRA, 2017).

Li et al. (2006) e Wei et al. (2008) utilizaram o mesmo protocolo de ensaio para avaliar a resistência à obstrução dos emissores. Foi utilizado como material causador da obstrução (areia), devidamente separada em oito faixas granulométricas, conforme a classificação da ISO 8486-1 (1997). O ensaio foi dividido em 8 fases, com duração de 50 minutos cada. As fases eram iniciadas com o sistema pressurizado por um período de 15 minutos, com mensuração da vazão de 25 emissores nos dois últimos minutos. Em seguida, o ensaio era interrompido por 30 minutos e depois o sistema acionado por mais 5 minutos, sem nenhuma medição de vazão. A intermitência promovida por essa característica de ensaio, simula o funcionamento do emissor no campo. Na primeira fase, os emissores foram operados sob uma concentração de partículas de 250 mg L^{-1} da menor faixa granulométrica. Ao término de cada fase, eram adicionadas ao tanque

250 mg L⁻¹ de uma nova mistura de partículas com diferentes granulometrias. Assim, a última fase do teste, continha todas as faixas granulométricas, numa concentração de 2000 mg L⁻¹.

O ensaio proposto por Faria (2013) avaliou o desempenho de 12 modelos de emissores, considerando três faixas granulométricas de dióxido de silício (SiO₂), com diâmetro de partículas entre 0,053- 0,500 mm (areia muito fina à areia fina) e, utilizando duas concentrações de partículas no reservatório de 125 mg L⁻¹ e 500 mg L⁻¹. Cada etapa do ensaio apresentou 80 horas de duração, sendo que ao final de cada uma, eram coletados dados de vazão. Na primeira etapa do ensaio, foi avaliado o desempenho dos emissores sem a presença das partículas sólidas. Além da avaliação da granulometria e da concentração das partículas, o estudo também contou com duas posições distintas de operação dos emissores planos, voltados para cima ou para baixo em relação ao tubogotejador. Os resultados obtidos indicaram que emissores que apresentam vazões menores (1,0-1,7 L h⁻¹) são mais susceptíveis à obstrução quando comparados com os de maiores vazões (2,0-3,5 L h⁻¹). Além disso, os emissores voltados com a saída para baixo, mostraram-se mais propensos ao entupimento do que voltados para cima, analisando o mesmo modelo de emissor.

Niu, Liu e Chen (2013) realizaram ensaios de obstrução de gotejadores utilizando misturas com partículas finas, com diâmetros menores do que 100 µm, separadas em oito faixas granulométricas. Para cada faixa granulométrica, oito concentrações de 250 à 2000 mg L⁻¹ foram avaliadas, trabalhando de forma intermitente. O procedimento em cada uma das etapas iniciava com o sistema operando por 30 minutos em uma concentração de 250 mg L⁻¹. Em seguida, o sistema era desligado por um período de 6 horas até o início da próxima fase, incrementando-se 250 mg L⁻¹ na mistura. De acordo com os resultados do ensaio, a severidade da obstrução está principalmente relacionada à concentração de partículas dispersas na água, sendo observado que valores a partir de 1250 mg L⁻¹ favorecem a ocorrência desse processo.

Oliveira et al. (2017) analisaram a sensibilidade à obstrução de dois emissores do tipo pastilha, utilizando dois tipos de argila (caulinita e montmorilonita) como fonte de obstrução. O diâmetro médio das partículas de caulinita e montmorilonita foi 2,651 e 2,296 µm, respectivamente. Foram avaliadas quatro concentrações de partículas entre 500 à 2000 mg L⁻¹. O sistema era operado durante 8 horas, seguidos de 16 horas em repouso, com tempo total de operação de 40 horas por ensaio. Não houve obstrução total de nenhum emissor nas condições avaliadas, no entanto, para concentrações acima de 1000 mg L⁻¹ foi observada redução de vazão na ordem de 9% para ambos tipos de argila, para o modelo de emissor mais sensível. A pesquisa relatada foi importante para demonstrar que processos de obstrução devido à formação de

aglomerados não são provocados somente por partículas de argila, mas sim pela combinação de faixas granulométricas envolvendo argila, silte e areia fina.

O laboratório PReSTI/IRSTEA (França) tem adotado um procedimento de ensaio no qual se utiliza como material causador de obstrução partículas de solo natural. Esse material é preparado conforme procedimento estabelecido pela norma ISO 11277 (2009), havendo destruição da matéria orgânica, dispersão da argila e peneiramento do solo. O ensaio é dividido em quatro fases, com duração de 40 horas cada fase, trabalhando em regime intermitente, operando 8 horas por dia. A primeira fase se inicia com uma concentração de 125 mg L^{-1} da menor partícula. Ao final de cada fase (40 horas) são acrescentados 125 mg L^{-1} de partículas com uma faixa de maior diâmetro. A concentração de partículas na última fase do ensaio é de 500 mg L^{-1} . As faixas granulométricas adicionadas em cada fase são: 1) 0 - 80 μm ; 2) 80 - 120 μm ; 3) 120 - 200 μm ; 4) 200 - 500 μm . Lavanholi (2016) avaliou o desempenho de 4 modelos de emissores utilizando esse procedimento de ensaio.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo das características de diferentes ensaios de obstrução avaliando partículas sólidas. O diâmetro e a concentração de partículas, tempo e número de fases, além de tamanho amostral, são os principais fatores divergentes observados nesses procedimentos.

Tabela 1. Características de procedimentos de ensaios de obstrução por partículas sólidas.

Autores	Características do procedimento de ensaio				
	Diâmetro (μm)	Concentração (mg L^{-1})	Número de fases	Tempo por fase	Tamanho amostral
Li et al. (2006)	53-300	250-2000	8	50 min	25
Wei et al. (2008)	53-300	250-2000	8	50 min	25
Faria (2013)	53-500	125-500	7	80 horas	10
Niu, Liu, Chen (2013)	0-100	250-2000	8	30 min	15
Lavanholi (2016)	0-500	125-500	4	40 horas	26
Oliveira et al. (2018)	<2,269	500-2000	1	40 horas	15

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação (LEMI) do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP).

3.1. Modelos de gotejadores avaliados

Foram utilizados dois modelos de fitas gotejadoras com emissores convencionais, integrados, do tipo pastilha (emissores planos). Ambas as fitas gotejadoras apresentaram diâmetro nominal de 17 mm, com emissores espaçados em 0,30 m. As características hidráulicas dos emissores avaliados estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características hidráulicas dos emissores

Fabricante	Modelo	Vazão na pressão de serviço (L h^{-1})	Pressão de serviço (kPa)	Expoente de fluxo do emissor (x)
NaanDanJain	Taldrip	0,55	98,1	0,46
Drip-Plan	Drip-Tech	1,55	98,1	0,54

Para cada emissor foram mensuradas as dimensões referentes à largura do canal, altura do dente e espaçamento entre dentes (Figura 2). O modelo Taldrip, apresenta uma profundidade do canal de 0,42 mm. O modelo Drip-Tech apresenta uma profundidade de 0,64 mm.

Figura 2. Características geométricas dos emissores avaliados A) Taldrip B) Drip-Tech

Outra estrutura presente nos emissores é o pré-filtro, responsável por prevenir a entrada de partículas relativamente grandes no labirinto. Esse componente apresenta a menor seção de passagem de 0,30 mm x 0,54 mm, para o modelo Taldrip (Figura 3A) e tem dimensões de 0,35 mm x 0,90 mm no modelo Drip-Tech (Figura 3B).

Figura 3. Pré-filtro dos emissores avaliados A) Taldrip B) Drip-Tech

A escolha desses dois modelos deve-se aos resultados apresentados por Lavanholi (2016). Para esses dois modelos, observou-se elevada variabilidade nos resultados de ensaio entre repetições consecutivas. Sobretudo, o modelo Taldrip mostrou-se bastante sensível à obstrução.

Na presente pesquisa, supõe-se que, ao melhorar a repetitividade de resultados para esses modelos, solucionam-se as limitações do protocolo de ensaios identificadas por Lavanholi (2016).

3.2. Bancada de ensaios

A bancada de ensaios foi constituída por um circuito hidráulicamente fechado, equipado com reservatório de 250 L, motobomba com rotor e carcaça em inox (marca Grundfos, modelo CM 10-2, 3,4 cv de potência, com vazão e altura manométrica máximas de $12 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e 35,4 mca, respectivamente), agitador dotado de hélice, linha de derivação com bifurcações simétricas, conjunto de coletores para medição da vazão dos emissores, calha para coleta e retorno da água para o reservatório (Figura 4).

Figura 4. Esquema da bancada de ensaios de obstrução de gotejadores

O uso de motobomba com rotor e carcaça em inox é indispensável para estudos de obstrução, visto que experiências anteriores no laboratório (PERBONI, 2016) indicaram significativa quantidade de resíduos metálicos provenientes da oxidação e abrasão de componentes de bombas convencionais com rotor e carcaça de ferro.

A distribuição de vazão entre 8 linhas de fitas gotejadoras, instaladas paralelamente, foi feita por meio de uma linha de derivação com bifurcações simétricas, sendo que isso é essencial para minimizar tendências na distribuição de partículas entre as linhas laterais. Lavanholi (2016) comprovou que não há diferença significativa na concentração de partículas entre linhas laterais alimentadas por linha de derivação com bifurcação simétrica. As linhas laterais possuíam 5 m de

comprimento, sendo que cada linha lateral tinha 17 gotejadores, totalizando 136 gotejadores na bancada. Os emissores foram alocados com a saída para baixo em relação a fita gotejadora, por representar maior sensibilidade à obstrução (FARIA, 2013).

O reservatório foi equipado com um agitador composto por hélice, motor elétrico e inversor de frequência, para garantir a permanência das partículas em suspensão. O reservatório de material plástico, com formato de tronco de cone e a velocidade apropriada de rotação do agitador (135 rpm), são importantes para evitar a sedimentação de partículas no fundo do reservatório. Velocidades de rotação excessivas induzem a formação de vórtices que provocam entrada de ar na sucção da bomba. Velocidades insuficientes permitem a sedimentação de partículas no reservatório. Sendo assim, a velocidade de rotação da hélice foi ajustada experimentalmente a fim de se obter uma velocidade de rotação máxima que não permitisse o acúmulo de partículas no fundo do reservatório, nem que possibilitasse a formação de vórtices suficientemente intensos a ponto de provocar a sucção de ar pela bomba.

A estrutura, já existente, é equipada com calhas metálicas instaladas em declive (2,18%), que garantem que a água escoada pelos gotejadores e pelos bocais presentes nos finais da linha retorne ao reservatório. Como medida preventiva à contaminação da água por materiais de origem externa, foram instaladas lonas plásticas nas laterais e na parte superior da bancada, além de cobertura do reservatório.

Os diâmetros de todos os segmentos de tubulação entre a bomba e a entrada das linhas laterais foram dimensionados a fim de proporcionar velocidades de escoamento acima de 1 m s^{-1} , visando assegurar que a velocidade da água seja suficiente para carregar as partículas do reservatório até a entrada das linhas laterais (PERBONI, 2016). O controle da velocidade de escoamento através de cada linha lateral foi feito acoplando-se um bocal no final da respectiva linha, sendo esse um mecanismo eficaz que assegura adequado controle da velocidade na linha e distribuição homogênea de partículas entre as linhas laterais. Os bocais foram selecionados para propiciar uma velocidade de escoamento próxima a 1 m s^{-1} em cada linha lateral.

Utilizou-se filtro de tela capaz de reter partículas de diâmetro maior do que $500 \text{ }\mu\text{m}$, logo após a saída do conjunto motobomba. Como medida preventiva, foi instalado mais um filtro no funil da calha coletora que retorna ao reservatório, com capacidade de filtragem de partículas com diâmetro imediatamente superior àquele adotado em dada condição de ensaio. A presença desse sistema é essencial para reter partículas maiores que aquelas pertencentes à condição de ensaio, sendo que tais contaminantes atingem a bancada de ensaios acidentalmente.

3.3. Ensaio de obstrução

A metodologia de ensaio executada é a mesma utilizada pelo laboratório francês PReSTI/IRSTEA, para avaliação de produtos comerciais há aproximadamente 40 anos. O procedimento é dividido em quatro etapas, cada uma com duração de 40 horas de funcionamento, operando durante 8 horas diárias, tendo, portanto, duração de cinco dias. Em cada etapa, as concentrações e as faixas granulométricas das partículas sólidas presentes no reservatório foram controladas, conforme especificado na Tabela 3.

Tabela 3. Distribuição da concentração das faixas granulométricas em cada fase.

Fase	Tempo (h)	Faixa granulométrica das partículas (μm)				Concentração total (mg L ⁻¹)
		< 75	75 - 125	125 - 212	212-500	
		Concentração de partículas (mg L ⁻¹)				
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

Dessa forma, foi possível verificar o desempenho dos emissores à obstrução em cada fase de ensaio, identificando a combinação de granulometria e concentração crítica de partículas para o desempenho dos modelos de gotejadores ensaiados. Foram realizadas três repetições do ensaio para cada modelo de emissor, utilizando-se água deionizada proveniente de osmose reversa.

3.4. Preparo das partículas sólidas utilizadas no ensaio de obstrução

As partículas sólidas utilizadas para avaliação da sensibilidade à obstrução dos gotejadores foram constituídas por uma mistura de areia, silte e argila, por se tratarem de partículas naturalmente encontradas em água de irrigação, a fim de que o procedimento reproduzisse as condições de campo. Dessa forma, na realização dos ensaios, foi utilizado solo disponível na ESALQ como fonte de partículas para os experimentos.

O solo foi preparado 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 a coleta, o solo foi seco ao ar, destorroado e passado por uma peneira de abertura 2 mm.

A primeira etapa do procedimento foi a destruição da matéria orgânica presente no solo. Foram preparadas amostras de 20 g de solo, alocadas em béqueres, onde foram adicionados 30 mL de água e 30 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30%. Após 15 horas de reação, os béqueres foram colocados em uma placa aquecedora, na qual a temperatura se manteve entre 60°C e 65°C, permanecendo ali até que a borbulha devida à reação de decomposição do peróxido tenha cessado.

A etapa seguinte consistiu em adicionar a cada amostra um volume de 25 mL de CaCl_2 a 1 mol L^{-1} e água destilada até que o volume completasse 250 mL, e então permanecer em repouso. Essa etapa teve a finalidade de flocular os minerais. Por meio do sifonamento do sobrenadante, ocorreu a eliminação do restante da matéria orgânica. O procedimento de adição de água foi repetido até que a condutividade elétrica do sobrenadante fosse inferior a 400 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

O passo seguinte foi responsável pela remoção de sais solúveis presentes na solução, como uma forma de evitar interferência na fase de dispersão (próximo passo). Para isso, as amostras em uma fração de volume solo (água de 1:4), foram alocadas em um agitador horizontal (shaker), durante o intervalo de tempo de 1 hora, e depois, deixado em repouso até a sedimentação das partículas. Após a sedimentação, a condutividade elétrica da solução sobrenadante era determinada novamente, até atingir o valor exigido pelo procedimento (400 $\mu\text{S cm}^{-1}$). Quando o valor observado é superior ao estabelecido pela norma, adiciona-se novamente água destilada e repete-se o processo de agitação e sedimentação, até se alcançar o valor exigido.

A fase seguinte consiste na dispersão dos minerais, cujo agente dispersante indicado pela norma é uma solução contendo 33 g de hexametáfosfato de sódio (NaPO_3) e 7 g de carbonato de sódio (Na_2CO_3) dissolvidos em 1 L de água destilada. No entanto, a norma permite a utilização de outros reagentes, sendo que para solos brasileiros, Camargo et al., (2009) indicam a utilização de uma solução com 20 g de hidróxido de sódio (NaOH) e 50 g de NaPO_3 dissolvidos em 5 L de água destilada. Foram então adicionados à cada recipiente com solo 100 mL de agente dispersante e depois retornou-se o recipiente novamente ao agitador por um período de 18 horas.

Depois da agitação, o conteúdo foi lavado com um jato de água destilada, na peneira com a abertura de 45 μm . Após lavado, tanto o material retido na peneira, quanto o material que passou (uma porcentagem do silte e argila) foram secos em estufa a 105°C. O material retido foi separado em 15 faixas granulométricas previamente estabelecidas, com o auxílio de peneiras. O conteúdo de silte e argila formam agregados, sendo dessa forma, necessário destorroar e peneirar novamente na peneira de 45 μm , garantido que apenas partículas menores fossem separadas para

o material de ensaio. Após o preparo, o material foi dividido nas quatro faixas granulométricas do ensaio de obstrução, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Faixas granulométricas a serem utilizadas no experimento para cada fase do ensaio.

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

3.5. Rotina de ensaio

Como o objetivo do protocolo de ensaio é avaliar a obstrução causada apenas por fatores físicos, a adoção de alguns procedimentos experimentais servem como medidas preventivas de contaminação de outras fontes de obstrução (química e biológica). Durante os ensaios foi utilizada água deionizada, além do monitoramento diário do pH e da condutividade elétrica (CE). Essas variáveis foram monitoradas por meio de pHmetro (marca Digimed, modelo DM-23) e condutivímetro (marca Digimed, modelo DM-32).

A condutividade elétrica correlaciona-se com a quantidade de sais dissolvidos na água, demonstrando a presença de íons, que em pH acima de 7,0 podem precipitar. Além disso, indica um padrão da água utilizada no ensaio, o qual poderá recomendar uma faixa ideal para o protocolo de ensaio. Procurou-se manter $\text{pH} = 6,5 \pm 0,5$, uma vez que valores acima dessa faixa favorecem a precipitação de íons, e valores abaixo, contribuem para a corrosão de componentes metálicos do sistema. Conforme a necessidade de correção, foi utilizado uma solução de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH) diluído na concentração de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$.

Para evitar atividade biológica utilizou-se cloração diária na concentração de 3 mg L^{-1} de cloro livre (Cl_2). Como fonte de cloro, utilizou-se o hipoclorito de sódio (NaOCl) à 10%, cuja massa específica é de 1200 kg m^{-3} e massa molecular de 74,5 g. Por cálculos estequiométricos, determinou-se o volume de NaOCl necessário para se obter uma concentração de cloro livre adequada no reservatório de 250L, conforme Equações de 1 a 4:

$$\frac{\text{Cl}_2}{\text{NaOCl}} = \frac{71}{74,5} = 0,953 \quad (1)$$

$$C_{\text{NaOCl}} = \frac{C_{\text{Cl}_2}}{0,953 \cdot 0,1} \therefore C_{\text{NaOCl}} = \frac{3 \text{ mg L}^{-1}}{0,0953} \therefore C_{\text{NaOCl}} = 31,5 \text{ mg L}^{-1} \quad (2)$$

$$m_{\text{NaOCl}} = C_{\text{NaOCl}} V_r = 31,5 \text{ mg L}^{-1} \cdot 250 \text{ L} = 7,87 \text{ g} \quad (3)$$

$$V_{\text{NaOCl}} = \frac{m_{\text{NaOCl}}}{\rho_{\text{NaOCl}}} = \frac{7,87 \text{ g}}{1,2 \text{ g cm}^{-3}} = 6,55 \text{ mL} \quad (4)$$

No início de cada ensaio foram instaladas fitas gotejadoras novas, das quais avaliou-se uma amostra de 104 emissores. Essa amostra foi submetida a ensaios para determinação de vazões e de coeficiente de variação de vazão devido a efeitos de fabricação (CVFq) utilizando-se água limpa, para verificar possível existência de imperfeição no lote de gotejadores a ser ensaiados. Caso houvesse, o gotejador que apresentasse problemas de vazão seria descartado, visto que a bancada fornecia mais amostras do que o necessário. Na sequência foi dado início ao ensaio com as partículas sólidas para se avaliar a sensibilidade à obstrução dos gotejadores.

A vazão dos gotejadores era monitorada ao final de cada dia de ensaio (após 8 horas de funcionamento), por meio da medição da massa de água coletada. Para a medição de massa foi utilizada uma balança digital (Marte®, modelo AS 5500C, escala 0,25 – 5000g, resolução de 0,01 g). A vazão de cada emissor foi obtida pela Equação 5, utilizando a massa coletada durante 30 minutos e a massa específica da água corrigida pela Equação 6, proposta por Tanaka et al. (2001). A temperatura era obtida no início da coleta por meio de termômetro com bulbo de mercúrio (marca Incoterm®, modelo 5003, escala de -10 à +110 °C, precisão ± 1 °C).

$$q = \frac{(m_F - m_I)}{\rho t} 3600 \quad (5)$$

$$\rho = 999,974950 \left[1 - \frac{(T - 3,983035)^2 (T + 301,797)}{522528,9 (T + 69,34881)} \right] \quad (6)$$

Em que: q – vazão (L h^{-1});

t – tempo de coleta (s);

m_F – massa do coletor + água (g);

m_I – massa do coletor (g);

ρ – massa específica da água (kg m^{-3}) e

T – temperatura da água (°C).

Ao final de cada ensaio realizou-se a limpeza da bancada, do reservatório e do sistema de bombeamento, para eliminar possíveis contaminantes e para assegurar a manutenção da qualidade da água entre ensaios consecutivos.

3.6. Análise de sensibilidade dos emissores à obstrução

A sensibilidade dos emissores à obstrução foi avaliada por aspectos quantitativo e qualitativo. Quantitativamente, por meio da proporção de redução da vazão dos emissores durante o tempo de ensaio. Como critério, foi considerado obstruído o emissor que apresentasse uma vazão menor ou igual a 75% em relação à vazão determinada no início do ensaio (Equação 7). O lote de gotejadores (52 emissores) foi considerado obstruído quando 25% dos gotejadores do lote fossem classificados como obstruídos (Equação 8).

$$q_a \leq 0,75q_0 \quad (7)$$

$$N_o \geq 0,25N_t \quad (8)$$

Em que: q_a – vazão atual do gotejador;

q_0 – vazão do gotejador determinada no início do ensaio;

N_o – número de gotejadores obstruídos, e

N_t – número total de gotejadores na amostra.

Qualitativamente, ao final de cada repetição, todos os emissores obstruídos foram abertos para obtenção de imagens utilizadas para o diagnóstico da causa e a localização da obstrução no interior dos labirintos. Para a aquisição de imagens dos labirintos de gotejadores utilizou-se um microscópio Mitutoyo TM equipado com uma câmera digital de alta resolução (1080p/2M). As causas de obstrução foram agrupadas nas seguintes categorias: (1) acúmulo de partículas de areia; (2) formação de agregados a partir de partículas finas; e, (3) partículas contaminantes. Embora o ensaio tenha sido executado com rigor, uma quantidade significativa das causas de obstrução foi devido a presença de contaminantes (fragmentos de tinta, filamentos de tecido, filamentos de raízes e fragmentos metálicos). Quanto a localização da obstrução, resultados foram agrupados dividindo-se o labirinto do gotejador em três regiões: início, meio e fim do labirinto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaios Preliminares

Foram realizados ensaios preliminares com a finalidade exclusiva de aprendizagem e identificação do grau de dificuldade envolvido na realização dos ensaios de obstrução. Esses ensaios serviram apenas para evidenciar o rigor requerido para condução de experimentos dessa natureza.

Como ensaio preliminar, foram realizadas três repetições para o emissor Taldrip. Nesses ensaios, apenas a primeira fase foi realizada para cada repetição, ou seja, partículas com diâmetro máximo de 75 μm e concentração de 125 mg L^{-1} . Na Figura 5 é apresentado o número de emissores obstruídos ao longo de cada dia da primeira fase para as três repetições.

Figura 5. Número de emissores obstruídos nas três repetições dos ensaios iniciais.

Após o término da primeira fase, os emissores foram abertos para se verificar a fonte causadora de obstrução. A disparidade excessiva do número de emissores obstruídos entre as repetições, pode ser explicada pela presença de contaminação de materiais sólidos provenientes da bancada, como por exemplo, resíduos de tinta que se desprenderam de partes da bancada de ensaio. Na primeira repetição, as fitas gotejadoras eram sustentadas por hastes metálicas, fonte desses resíduos de tinta (Figura 6). Ao término da primeira repetição, as hastes metálicas foram

removidas da bancada, e substituídas por um suporte de PVC. Essa ação permitiu a redução da contaminação da primeira para segunda repetição, conforme pode-se observar na repetição 2 (Figura 5).

Figura 6. Resíduos de tinta encontrados no interior dos labirintos do modelo Taldrip ao final da primeira repetição dos ensaios preliminares.

Na segunda repetição, o número de emissores obstruídos por contaminantes reduziu, porém ainda era observado. Para minimizar esse efeito, foi adicionado no reservatório, uma peneira, cujo diâmetro de passagem era um pouco superior ao das partículas utilizados no ensaio. Com essa ação, na repetição 3, o número de emissores obstruídos na primeira fase reduziu para apenas 3 (Figura 5).

Diante do apresentado nos ensaios iniciais, o controle de variáveis de fonte externa é fundamental para que o ensaio represente de fato, apenas a obstrução causada por partículas sólidas de interesse. Além de recomendações propostas por Lavanholi et al. (2018), faz-se de extrema necessidade o uso de motobomba com carcaça e rotor de inox; instalação de filtro com abertura imediatamente superior ao tamanho das partículas correspondentes a fase de ensaio, sendo que esse filtro pode ser instalado na saída da bomba ou a jusante da calha coletora, sobre o reservatório; construção da bancada utilizando componentes e material que não sofra processos de corrosão a fim de evitar o desprendimento de partículas contaminantes, sendo que material plástico (PVC) inoxidável ou alumínio são recomendados; não empregar tintas em componentes da bancada.

4.2. Ensaios definitivos

4.2.1. Características da água de ensaio

O monitoramento diário da temperatura da água teve como objetivo determinar a massa específica da água no momento de coleta da vazão (Figura 7). A temperatura da água não foi controlada e conseqüentemente variou conforme oscilações na temperatura do ambiente. A primeira repetição do ensaio foi a que apresentou maior valores de temperatura. Por outro lado, os valores de mínima são observados na repetição 3. A maior diferença entre temperatura máxima e mínima considerando as três repetições foi de 7,6 °C (Figura 7).

Figura 7. Temperatura da água de ensaio ao final de cada dia para as três repetições.

O pH foi mantido entre 6 e 7 (Figura 8), para evitar a formação de precipitados químicos e para assegurar padrão de características da água entre ensaios distintos. O pH era corrigido para valores próximos a 6 no início do dia e, ao decorrer do dia, era observado um aumento desse valor. Especialmente na fase 1, composta principalmente por argila, fez-se necessária a correção depois de 4 horas de ensaio, pois o valor aumentava para próximo de 7. Esse fato pode ser explicado pela presença de bases (NaOH) durante o procedimento de preparo das partículas sólidas, as quais podem ter sido atraídas pela capacidade da argila em agregar cargas elétricas, que se desprendiam da superfície conforme o decorrer do ensaio. Nas demais fases, o controle era realizado apenas no início do dia.

Figura 8. Valores de pH ao final de cada dia de ensaio para as três repetições

A condutividade elétrica da água proveniente do deionizador apresentava valores em torno de $10 \mu\text{S cm}^{-1}$. De forma geral, a condutividade elétrica da água apresentou um aumento linear no decorrer dos dias de ensaio. Os valores máximos na primeira, segunda e terceira repetição foram de 480,1; 428,4 e 498,4 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente (Figura 9). O aumento da condutividade deve-se principalmente a adição dos químicos NaOCl e HCl durante a cloração e correção do pH, efetuada diariamente.

Figura 9. Condutividade elétrica da água ao final de cada dia de ensaio para as três repetições.

O acompanhamento dessas variáveis teve como principal propósito oferecer um padrão de qualidade de água para o ensaio. Procurou-se retratar as mesmas condições entre as repetições, além de controlar os fatores químicos e biológicos do processo de obstrução.

4.2.2. Obstrução dos gotejadores

O número de emissores obstruídos ao longo dos ensaios é apresentado na Figura 10. Analisando o emissor Tal drip, observa-se que nas repetições 1 e 2 não houve nenhum emissor obstruído na primeira fase, enquanto que na repetição 3, três emissores estavam obstruídos. Na segunda fase dos ensaios, a terceira repetição apresentou 12 emissores obstruídos, próximo ao limite crítico, enquanto as demais repetições apenas três emissores (Figura 10A). A obstrução atingiu o nível crítico sempre no primeiro dia da terceira fase, diferenciando-se apenas quanto ao número de emissores obstruídos. Dessa forma, a adição de partículas, cujo diâmetro ultrapasse 125 μm combinado à concentração de partículas superior a 250 mg L^{-1} se mostrou propícia à obstrução desse modelo de emissor. Ao final da quarta fase de ensaio, na primeira repetição 44 emissores foram obstruídos. Para as repetições 2 e 3, todos os emissores estavam obstruídos (Figura 10A).

O emissor Drip-Tech se mostrou menos susceptível à obstrução nas condições de ensaio avaliadas. Na repetição 2 não houve nenhum emissor obstruído, enquanto que na terceira repetição apenas um emissor obstruiu. Na repetição 1, oito emissores foram obstruídos na fase 4 do ensaio (Figura 10B).

A)

B)

—●— REP 1 -○- REP 2 -▼- REP 3 - - - Crítico

Figura 10. Número de emissores obstruídos para os modelos A) Taldrip e B) Drip-Tech

Avaliando-se o modelo Taldrip, nas fases 1 e 2 do ensaio foi observado diferença do número de emissores obstruídos. Ao longo das determinações de vazão não foi observada redução parcial de vazão nos emissores, ou seja, emissores estavam operando normalmente ou estavam completamente obstruídos. Lavanholi et al. (2018) também não relatam a ocorrência de redução parcial da vazão de emissores, sendo que, a vazão estava próxima da nominal ou então o emissor estava totalmente obstruído.

O modelo Taldrip se apresentou mais susceptível à obstrução quando comparado ao modelo Drip-Tech nas condições de ensaio avaliadas. Em geral, emissores com baixa vazão, apresentam labirintos com pequenas dimensões (Figura 2), característica que favorece condições à obstrução (LI et al., 2008; FARIA, 2013; OLIVEIRA et al., 2017).

Comparando os resultados obtidos na a repetição 1 para os dois modelos avaliados, observou-se uma incompatibilidade com as demais repetições. Apesar do emissor Taldrip ser mais sensível à obstrução, essa repetição foi a menos severa para esse modelo. Ao mesmo tempo, considerando o modelo Drip-Tech, a primeira repetição apresentou maior severidade do que as demais repetições. É importante ressaltar que ambos os modelos de emissores sempre foram ensaiados simultaneamente e sob as mesmas condições de risco de obstrução. Ao abrir os emissores para avaliar a causa da obstrução, foram encontradas partículas de formato irregular (não esféricas), apresentando uma das dimensões maior do que as demais (Figura 11). Essas partículas, eram capazes de atravessar o pré-filtro do emissor Drip-Tech, e retidas pelo pré-filtro do emissor Taldrip, explicando possivelmente a anormalidade de obstrução dentro da mesma repetição. Mesmo apresentando uma melhor resistência à obstrução, o emissor Drip-Tech apresenta o pré-filtro com área de passagem superior ao emissor Taldrip, permitindo que partículas de maiores dimensões adentrem ao labirinto.

Figura 11. Partículas de dimensões superiores às partículas de ensaio.

Apesar do nível de obstrução crítico ser atingido no mesmo momento de ensaio (primeiro dia da terceira fase) para o modelo Taldrip, houve variabilidade entre as repetições. Em termos percentuais, a maior variabilidade observada, considerando as três repetições em um mesmo dia, foi de 26,92%. Supõe-se que, embora os ensaios tenham sido executados com rigor, a variabilidade entre as repetições pode ser explicada pela presença de partículas contaminantes na água de ensaio, visto que visualmente não foram identificados indícios de agentes químicos ou biológicos de obstrução.

Ao comparar os resultados desta pesquisa aos obtidos por Lavanholi (2016), a adoção de medidas de controle favoreceu melhoria na repetitividade dos ensaios. No entanto, a disparidade entre a fase em que ocorria a obstrução para o lote de emissores foi o fator que mais se destacou considerando os dois experimentos. Nos resultados obtidos por Lavanholi (2016), o emissor Taldrip atingiu o limite crítico na primeira fase de ensaio para todas as repetições, e atingiu valores próximos a 100% dos emissores obstruídos ao final da segunda fase, em duas das três repetições realizadas (Figura 12A). Para o emissor Drip-Tech $1,55 \text{ L h}^{-1}$ em duas repetições executadas, o mesmo apresentou-se sensível a obstrução na quarta fase de ensaio (Figura 12B).

Por outro lado, nos ensaios aqui descritos, o emissor Taldrip apresentou sensibilidade à obstrução apenas na fase 3. Já o emissor Drip-Tech não se mostrou sensível a obstrução em nenhuma das fases (Figura 12). A comparação entre os resultados das duas pesquisas evidencia o rigor necessário para a condução de experimentos relacionados a estudos de obstrução de emissores. Pequenos detalhes experimentais podem conduzir a alterações drásticas nos resultados e conclusões incorretas acerca do desempenho de determinado modelo de gotejador.

Figura 12. Comparação entre o nível de obstrução com os resultados obtidos por Lavanholi (2016) para os modelos A) Taldrip e B) Drip-Tech.

4.2.3. Processos e posição da obstrução nos labirintos

Ao final de cada repetição, todos os emissores obstruídos foram abertos para se verificar a causa e a localização da obstrução no interior do labirinto. Ao todo, foram abertos 147 emissores do modelo Taldrip. As análises a seguir foram realizadas apenas para o emissor Taldrip, pois esse modelo se apresentou o mais sensível à obstrução. O número de emissores obstruídos do modelo Drip-Tech foi pequeno e não possibilitaria a realização das análises apresentadas na sequência.

O processo de acúmulo de areia (partículas grandes) foi o mais representativo nas três repetições, seguido da formação de agregados e, posteriormente, pela presença de contaminantes como causa da obstrução (Figura 13). Em relação ao acúmulo de areia, foi observado um

percentual máximo de 68% na segunda repetição, e um valor mínimo de 45% na terceira repetição. Ao se tratar da agregação de partículas, foram mensurados valores entre 29 e 35% do número total de emissores obstruídos. E, por fim, a presença de contaminantes foi responsável pela obstrução de 19,6% dos emissores, na repetição 3. Na segunda repetição houve apenas 2% de emissores obstruídos por essa causa (Figura 13).

Figura 13. Processos de obstrução observados em cada repetição do ensaio.

A Figura 14 apresenta emissores do modelo Taldrip obstruídos devido ao acúmulo de partículas de areia. Nota-se que não houve obstrução de toda a extensão do labirinto. Além disso, na posição em que se inicia o acúmulo de sedimentos sempre foi identificada a presença de uma partícula de dimensão relativamente grande, sendo esta, provavelmente a responsável por desencadear o processo de obstrução.

Figura 14. Obstrução por acúmulo de areia para o emissor Taldrip

O tamanho da partícula é reportado como principal responsável pela obstrução física (ADIN; SACKS, 1991; AMARAL, 2017; YU et al., 2018a). Verificando a sensibilidade à obstrução de um modelo de tubogotejador do tipo cilíndrico, cuja vazão era de 2 L h^{-1} , Perboni (2016) concluiu que a maior faixa granulométrica ($250\text{-}500 \mu\text{m}$) foi a que proporcionou a maior obstrução. A faixa de partículas mais fina ($53\text{-}105 \mu\text{m}$) não se mostrou capaz de causar a obstrução em nenhuma das concentrações avaliadas (100 , 250 e 500 mg L^{-1}).

Talamini Júnior (2018) avaliando a obstrução do emissor Taldrip apenas com partículas de areia, em três faixas granulométricas ($53\text{-}125$, $125\text{-}212$ e $212\text{-}500 \mu\text{m}$) e quatro concentrações (125 , 250 , 375 e 500 mg L^{-1}) constatou que independente da concentração de partículas, as duas faixas granulométricas de maiores diâmetros foram determinantes para a obstrução dos emissores.

Nos fenômenos de agregação, observa-se a presença de um aglomerado de partículas finas, que apresenta dimensão relativamente grande, o qual sedimenta numa localização qualquer ao longo do labirinto, diminui a seção de passagem, e propicia condições para que outras partículas se depositem e, finalmente, obstruam o emissor (Figura 15).

Figura 15. Obstrução completa causada pela formação de aglomerados de partículas finas para o modelo Taldrip.

Em concentrações acima de 1000 mg L^{-1} , Niu, Liu e Chen (2013) relatam aumento do risco de obstrução por partículas finas ($< 100 \mu\text{m}$). Lavanholi (2016) avaliando o emissor Taldrip e seguindo protocolo de ensaios similar, relata um percentual de 33% dos emissores obstruídos pela formação de agregados, sendo que resultado similar foi obtido nessa pesquisa (entre 29% e 35%).

Dentre as partículas contaminantes foram destacados a presença de filamentos de tecidos e de raízes, e fragmentos de ferro (Figura 16). Os filamentos de tecidos podem ter adentrado na bancada durante as rotinas de determinação de vazão. A presença de filamentos de raiz está associada ao preparo do composto de partículas sólidas a partir de solo natural. Embora o procedimento de preparo de partículas inclua processos de destruição da matéria orgânica e secagem a 105°C , verifica-se que alguns filamentos de raízes não foram totalmente destruídos. A extração de amostras de solo a partir de camadas mais profundas pode ser uma ação adequada para reduzir o risco de existência de filamentos de raízes no composto utilizado nos ensaios de obstrução. Os fragmentos de ferro podem ser oriundos do suporte do agitador e demais acessórios da bancada de ensaio. Todos esses contaminantes apresentaram formato irregular, sendo que, pelo menos uma das dimensões é menor do que o filtro e a peneira instalada no retorno do reservatório, e, portanto, permite a circulação do contaminante no sistema. Tais contaminantes podem ser minimizados ao evitar o uso de materiais metálicos como constituintes da bancada de testes.

Figura 16. Obstrução causada pela presença de contaminantes A) filamento de raiz e B) fragmentos de metal.

A presença de agentes contaminantes é recorrente nos procedimentos de ensaio de obstrução (NIU; LIU; CHEN, 2013; LAVANHOLI, 2016; ZHANG et al., 2017). Ao investigarem as causas da obstrução, esses autores relataram a presença de inúmeras partículas

indesejadas. Esse fato reforça a necessidade de uma série de medidas de controle e cautela na execução desses procedimentos.

Em relação à localização da obstrução nos labirintos dos emissores, observou-se comportamento distinto entre os resultados da repetição 1 quando confrontados às demais repetições. Na repetição 1, a parte inicial do labirinto foi a região com maior incidência de obstrução. Já na segunda e terceira repetições, os defletores do meio tiveram um maior número de ocorrências. Em todas as repetições, a parte final do labirinto foi a menos susceptível à obstrução (Figura 17). Nos ensaios realizados, não foram tomadas medidas quanto à orientação do labirinto (mesmo sentido ou oposto) em relação ao movimento da água. Esse fato pode ter contribuído para a variabilidade desses resultados entre a repetição 1 com as repetições 2 e 3.

Figura 17. Posição no labirinto do início de deposição de partículas.

Em número absolutos, considerando todas as repetições, a região inicial do labirinto foi a que apresentou o maior número de emissores obstruídos (63), seguida da região do meio (53) e por último, o terço final do labirinto (31). A Figura 18 demonstra diferentes locais onde ocorreu a obstrução.

Figura 18. Locais de deposição de partículas ao longo do labirinto A) no início com acúmulo de partículas de areia; B) no início com formação de agregados; C) na região central e D) no fim.

Zhang (2017) avaliando a influência da pressão (constante ou pulsante) na sensibilidade à obstrução de emissores, identificaram três principais locais de obstrução causados por partículas menores do que $125\ \mu\text{m}$: (1) na entrada e na porção inicial do labirinto, sendo esse o mais recorrente; (2) obstrução completa até metade do labirinto e (3) obstrução completa em todo o labirinto.

Estudando o comportamento de partículas menores do que $100\ \mu\text{m}$, Niu, Liu e Chen (2013) observaram que a entrada do labirinto foi a região mais propícia à obstrução. Além disso, ao longo do labirinto e ao final do mesmo, também foram observadas zonas de depósito de sedimentos, porém, em menor ocorrência, corroborando com os resultados obtidos nessa pesquisa. Esses autores descrevem que a entrada do labirinto apresenta características de escoamento diferente do restante do labirinto. Baixa velocidade, associada a dimensões reduzidas, favorecem a sedimentação de partículas, sendo dessa forma a região mais sensível à obstrução. Apesar do comportamento hidráulico ao longo de um labirinto ser diferente quanto a distribuição de velocidade, zonas de turbulência e energia cinética turbulenta (ZHANG et al., 2010; AL-MUHAMMAD; TOMAS; ANSELMET, 2016), o acúmulo de areia se mostrou o processo de maior ocorrência em todos os locais do labirinto, reforçando que o diâmetro da partícula é um fator primordial na obstrução por partículas sólidas.

4.3. Recomendações para melhoria do protocolo de ensaios

Observações decorrentes dos experimentos apontam para a necessidade de rigor na execução de experimentos de obstrução, especialmente no que diz respeito a medidas para evitar a contaminação da água utilizada nos ensaios. Entenda-se que, neste contexto, contaminação refere-se a partículas externas e indesejadas que de algum modo atingem a bancada de ensaios e provocam a obstrução de emissores. A presença de partículas contaminantes impacta na variabilidade dos resultados de ensaio em sucessivas repetições, e, sobretudo, pode alterar as possíveis conclusões a respeito do desempenho de um material sob avaliação. Na sequência são discutidas recomendações que tem por objetivo padronizar algumas condições de ensaio a fim de melhorar a repetitividade de resultados, minimizar a influência de contaminantes e, por fim, conferir confiabilidade ao protocolo de ensaios. As sugestões apresentadas complementam o que foi discutido por Lavanholi et al. (2018).

1. O uso de motobomba com carcaça e rotor em inox se mostrou adequado para a realização de ensaios de obstrução, pois não se observou alterações na qualidade da água, provenientes da oxidação e abrasão de componentes do conjunto motobomba. Não foi identificado indícios visuais de desgaste no rotor nem na carcaça da bomba após a execução dos ensaios.
2. Visto que o protocolo de ensaios tem como objetivo avaliar a sensibilidade de emissores à obstrução provocada por partículas sólidas, o efeito de agentes químicos e biológicos deve ser minimizado. Recomenda-se padronizar a condutividade elétrica inicial e controlar o pH da água utilizada nos ensaios. Nessa pesquisa utilizou-se água com condutividade elétrica inicial de até $10 \mu\text{S.cm}^{-1}$ e manteve-se o pH da água entre 6 e 7, efetuando-se correções diárias. Rotinas de correção de pH foram seguidas por cloração na concentração de 3 mg L^{-1} de cloro livre. Acredita-se que as medidas descritas foram efetivas para evitar a ação de fatores químicos e biológicos, uma vez que não se observou visualmente obstrução causadas por tais agentes.
3. A instalação de uma tela de filtragem entre a calha coletora e o reservatório é essencial para reduzir a circulação de contaminantes no circuito hidráulico. A tela de filtragem deve apresentar tamanho de abertura imediatamente superior àquele corresponde ao tamanho de partículas utilizados em determinada fase de ensaio. Acredita-se que essa seja uma medida apropriada para reduzir a influência de partículas contaminantes nos ensaios.
4. Padronizar a posição (saída de água voltada para baixo em relação a fita gotejadora) e orientação do labirinto no momento da instalação de todos emissores em avaliação, de

acordo com a recomendação do fabricante, reduzindo dessa forma mais uma fonte de variabilidade.

5. A abertura de emissores e aquisição de imagens de labirintos de gotejadores obstruídos ao final do ensaio é importante para diagnosticar as causas da obstrução e verificar se a obstrução não foi provocada por contaminantes, oferecendo maior confiabilidade aos resultados do ensaio.
6. Adoção de rotinas rigorosas de limpeza/higienização da bancada antes de iniciar ensaios, incluindo a circulação e descarte de água clorada, a fim de remover resíduos de ensaios anteriores.
7. O solo a ser utilizado para preparo do composto de partículas deve ser obtido de perfis com profundidade suficientemente grande, a fim de reduzir a existência de filamentos de raízes que podem atuar como contaminante nos ensaios de obstrução. Embora a norma ISO 11277 inclua procedimentos para destruição de matéria orgânica, comprovou-se que tais procedimentos não são efetivos na destruição de filamentos de raízes.
8. A inclusão de um modelo de emissor bastante sensível à obstrução em todos os ensaios parece ser uma estratégia interessante para detecção rápida da inconsistência de resultados, e portanto, para a validação de resultados de ensaio. Por exemplo, realizando-se repetições de ensaio avaliando o modelo Taldrip $0,55 \text{ L h}^{-1}$ define-se a fase do ensaio em que a obstrução deve ocorrer, havendo também uma expectativa de variabilidade de resultados entre sucessivos ensaios. Incluindo-se esse modelo de emissor em todos os ensaios futuros, torna-se possível estabelecer um critério para validação de resultados de ensaio, pois há uma expectativa de resultados para esse modelo, que, sempre que atingida indica que o ensaio foi executado com o devido rigor.

5. CONCLUSÕES

Essa pesquisa permitiu identificar limitações e enunciar recomendações para melhoria do protocolo de ensaios em discussão na ISO/DTR 21540. Essencialmente, as recomendações tratam dos seguintes aspectos: padronização de características da água utilizada nos ensaios; rotinas diárias de controle de pH e cloração da água; diversas medidas para minimizar a influência de agentes contaminantes nos ensaios de obstrução, sendo este um aspecto bastante crítico nesses ensaios; estratégia para validação de resultados de ensaio baseada no uso de um modelo de emissor cujo desempenho seja conhecido. A presença de partículas contaminantes impacta na variabilidade dos resultados de ensaio em sucessivas repetições, e, sobretudo, pode alterar as possíveis conclusões a respeito do desempenho de um material sob avaliação. A adoção desses procedimentos confirmou a hipótese desse trabalho, visto que se observou repetitividade entre os ensaios realizados, indicando sempre o mesmo ponto crítico de obstrução para o emissor que se mostrou sensível ao ensaio ($T_{aldrip} 0,55 \text{ L h}^{-1}$).

O acúmulo de partículas com dimensões relativamente grande ($> 125 \mu\text{m}$) foi a principal causa de obstrução, reforçando a probabilidade de que a granulometria de partículas é um fator dominante nos processos de obstrução quando se usa esse protocolo de ensaios.

Os problemas de obstrução ocorreram com maior frequência nos primeiros defletores, ou seja, no início do labirinto. Pesquisas futuras devem investigar possibilidades de melhoria nas características geométricas da entrada do labirinto, buscando melhorar o desempenho de emissores operados em condições de risco de obstrução.

REFERÊNCIAS

- ADIN, A.; SACKS, M. Dripper Clogging Factors in Wastewater Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 117, n. 6, p. 813–826, 1991.
- 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, set. 2016.
- AMARAL, M. A. C. M. do. Efeito do pulso de partículas sólidas na obstrução de tubogotejadores. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2017.
- AYARS, J. e.; BUCKS, D. A.; LAMM, F. R.; NAKAYAMA, F. S. Introduction. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. (Ed.). *Microirrigation for Crop Production*. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 1–26.
- BATISTA, R. O.; DE OLIVEIRA, R. A.; FIGUEIREDO, V. B.; DA SILVA, K. B.; DA, D. A.; FERREIRA, C. Vazão de gotejadores com distintos tempos de irrigação aplicando água residuária de suinocultura e água de abastecimento. v. 34, n. 6, p. 1283–1295, 2014.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. Viçosa: Viçosa UFV, 2006.
- BOUNOUA, S.; TOMAS, S.; LABILLE, J.; MOLLE, B.; GRANIER, J.; HALDENWANG, P.; IZZATI, S. N. Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches. *Irrigation Science*, v. 34, n. 4, p. 1–16, 2016.
- BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R. G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. *Agricultural Water Management*, v. 2, n. 2, p. 149–162, 1979.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada)
- 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.
- CHAUHDARY, J. N.; BAKHSH, A.; AHMAD, N.; MEHMOOD, K. Optimizing chlorine use for improving performance of drip irrigation system under biologically contaminated water source. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, v. 52, n. 3, p. 829–835, 2015.

- FARIA, L. do A. Proposta de norma técnica de ensaio para tubogotejadores de irrigação: resistência ao entupimento por particulados sólidos em suspensão. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2013.
- FENG, D.; KANG, Y.; WAN, S.; LIU, S. Lateral flushing regime for managing emitter clogging under drip irrigation with saline groundwater. *Irrigation Science*, v. 35, p. 217–225, 2017.
- 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, 2018.
- FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. . Microirrigação gotejamento e microaspersão. Maringá: Eduem, 2012.
- GAMRI, S.; SORIC, A.; TOMAS, 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. Trickle Irrigation: Prevention of Clogging. *Transactions of the ASAE*, v. 22, n. 3, p. 0514–0519, 1979.
- 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, mar. 1981.
- HILLS, D. J.; NAWAR, F. M.; WALLER, P. M. Effects of Chemical Clogging on Drip-Tape Irrigation Uniformity. *Transactions of the ASABE*, v. 32, n. 4, p. 1202–1206, 1989.
- HOFFMAN, G. J.; MARTIN, D. L. Engineering systems to enhance irrigation performance. *Irrigation Science*, v. 14, n. 2, p. 53–63, 1993.
- _____. ISO 11277: soil quality – determination of particle size distribution in mineral soil material – method by sieving and sedimentation. Geneva, 2009. 34 p.
- JUN, Z.; WANHUA, Z.; YIPING, T.; ZHENGYING, W.; BINGHENG, L. Numerical investigation of the clogging mechanism in labyrinth channel of the emitter Zhang. *Internacional Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 70, n. 13, p. 1598–1612, 2007.
- LAVANHOLI, R. Avaliação de procedimento de ensaio para determinação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas sólidas. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2016.
- LAVANHOLI, R.; OLIVEIRA, F. C.; CAMARGO, A. P.; FRIZZONE, J. A.; MOLLE, B.; AIT-MOUHEB, N.; TOMAS, S. Methodology to evaluate dripper sensitivity to clogging due to solid particles: An assessment. *The Scientific World Journal*, p. 1-9, 2018.

- LI, Y. K.; YANG, P. L.; REN, S. M.; XU, T. W. Hydraulic characterizations of tortuous flow in path drip irrigation emitter. *Journal of Hydrodynamics*, v. 18, n. 4, p. 449–457, 2006.
- LI, Y.; YANG, P.; XU, T.; REN, S.; LIN, X.; WEI, R.; XU, H. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter. *Irrigation Science*, v. 26, n. 5, p. 427–438, 2008.
- LILI, Z.; YANG, P.; REN, S.; LI, Y.; LIU, Y.; XIA, Y. Chemical Clogging of Emitters and Evaluation of Their Suitability for Saline Water Drip Irrigation. *Irrigation and Drainage*, v. 65, n. 4, p. 439–450, 2016.
- LIU, H.-S.; LI, Y.-K.; LIU, Y.-Z.; YANG, P.-L.; SHU-MEI, R. Flow characteristics in energy dissipation units of labyrinth path in the drip irrigation emitters with dpiv technology. v. 21, n. 6, p. 137–145, 2010.
- LIU, H.; SUN, H.; LI, Y.; FENG, J.; SONG, P.; ZHANG, M. Visualizing Particle Movement In Flat Drip Irrigation Emitters With Digital Particle Image Velocimetry. *Irrigation and Drainage*, v. 65, n. 4, p. 390–403, 2016.
- NAKAYAMA, F. S.; BOMAN, B. J.; PITTS, D. J. Maintenance. In: F.R. LAMM; J.E. AYARS; F.S. NAKAYAMA (Ed.). *Microirrigation for Crop Production*. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 389–430.
- NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science*, v. 12, n. 4, p. 187–192, 1991.
- NIU, W.; LIU, L.; CHEN, X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. *Irrigation Science*, v. 31, n. 4, p. 545–555, 14 jul. 2013.
- OLIVEIRA, F.; LAVANHOLI, R.; CAMARGO, A.; FRIZZONE, J.; AIT-MOUHEB, N.; TOMAS, S.; MOLLE, B. Influence of Concentration and Type of Clay Particles on Dripper Clogging. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, v. 6, n. 1, p. 1, 2017.
- OLIVEIRA, F. C. de. Processo de obstrução causado por partículas de argila em suspensão. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2017.
- PATIL, S. S.; NIMBALKAR, P. T.; JOSHI, A. Hydraulic Study, Design & Analysis of Different Geometries of Drip Irrigation Emitter Labyrinth. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, v. 2, n. 5, p. 455–462, 2013.
- PERBONI, A. Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2016.

- PINTO, M. F. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de filtragem com reversão de fluxo de alta frequência. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2013.
- PINTO, M. F.; MOLLE, B.; ALVES, D. G.; AIT-MOUHEB, N.; CAMARGO, A. P. de; FRIZZONE, J. A. Flow rate dynamics of pressure-compensating drippers under clogging effect. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 5, p. 304–309, maio 2017.
- PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; ELBANA, M.; DURAN-ROS, M.; BARRAGÁN, J.; DE CARTAGENA, F. R.; LAMM, F. R. Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents. *Agricultural Water Management*, v. 97, n. 6, p. 883–891, 2010.
- PUIG-BARGUÉS, J.; LAMM, F. R. Effect of Flushing Velocity and Flushing Duration on Sediment Transport in Microirrigation Driplines. *Transactions of the ASABE*, v. 56, n. 5, p. 1821–1828, 2013.
- RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SHISHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrigation Science*, v. 13, n. 3, p. 129–139, 1992.
- SÁNCHEZ, L. D.; VALENCIA-ZULUAGA, V.; ECHEVERRI-SÁNCHEZ, A.; VISSCHER, J. T.; RIETVELD, L. C. Impact of Upflow Gravel Filtration on the Clogging Potential in Microirrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 142, n. 1, p. 1–7, 2016.
- SONG, P.; LI, Y.; ZHOU, B.; ZHOU, C.; ZHANG, Z.; LI, J. Controlling mechanism of chlorination on emitter bio-clogging for drip irrigation using reclaimed water. *Agricultural Water Management*, v. 184, n. 1, p. 36–45, 2017.
- TALAMINI JUNIOR, M. V. Concentração e granulometria de partículas de areia na obstrução de gotejadores. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2018.
- THILL, A.; MOUSTIER, S.; AZIZ, J.; WIESNER, M. R.; BOTTERO, J. Y. Floccs restructuring during Aggregation: Experimental evidence and numerical simulation. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 243, n. 1, p. 171–182, 2001.
- 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.
- YU, L.; LI, N. A.; 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, 2018a.

- YU, L.; LI, N.; LIU, X.; YANG, Q.; LONG, J. Influence of flushing pressure, flushing frequency and flushing time on the service life of a labyrinth-channel emitter. *Biosystems Engineering*, v. 172, p. 154–164, 2018b.
- 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, 30 set. 2011.
- 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.; ZHENG, W.; WANG, C.; ZHANG, C.; NIU, M. Effects of drip irrigation models on chemical clogging under saline water use in Hetao district, China. *Water*, v. 10, n. 345, p. 1–13, 2018.
- ZHENGYING, W.; MENG, C.; XIA, L.; YIPING, T.; BINGHENG, L. Flow Behaviour Analysis and Experimental Investigation for Emitter Micro-channels. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, v. 25, n. 4, p. 729–737, 2012.
- ZHOU, B.; LI, Y.; SONG, P.; ZHOU, Y.; YU, Y.; BRALTS, V. Anti-clogging evaluation for drip irrigation emitters using reclaimed water. *Irrigation Science*, v. 35, n. 3, p. 181–192, 2017.