



**UNICAMP**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

GUSTAVO LOPES MUNIZ

**PROCESSOS DE OBSTRUÇÃO CAUSADOS POR CARBONATO DE CÁLCIO E  
PARTÍCULAS SÓLIDAS: SIMULAÇÃO, EXPERIMENTAÇÃO E DESEMPENHO  
DE PROTÓTIPOS DE GOTEJADORES**

CAMPINAS  
2022

GUSTAVO LOPES MUNIZ

**PROCESSOS DE OBSTRUÇÃO CAUSADOS POR CARBONATO DE CÁLCIO E  
PARTÍCULAS SÓLIDAS: SIMULAÇÃO, EXPERIMENTAÇÃO E DESEMPENHO  
DE PROTÓTIPOS DE GOTEJADORES**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de Água e Solo.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Pires de Camargo

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO GUSTAVO LOPES MUNIZ, E ORIENTADA PELO PROF. DR. ANTONIO PIRES DE CAMARGO.

CAMPINAS  
2022

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M925p Muniz, Gustavo Lopes, 1993-  
Processos de obstrução causados por carbonato de cálcio e partículas sólidas : Simulação, experimentação e desempenho de protótipos de gotejadores / Gustavo Lopes Muniz. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Antônio Pires de Camargo.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Irrigação por gotejamento. 2. Fluidodinâmica computacional. 3. Água - Qualidade. 4. Incrustação. 5. Carbonato de cálcio. I. Camargo, Antônio Pires de, 1986-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Clogging processes caused by calcium carbonate scaling an solid particles : simulation, experimentation and performance of drippers prototypes

**Palavras-chave em inglês:**

Drip irrigation

Computational fluid dynamics

Water - Quality

Scale

Calcium carbonate

**Área de concentração:** Água e Solo

**Títuloção:** Doutor em Engenharia Agrícola

**Banca examinadora:**

Antônio Pires de Camargo [Orientador]

Fernando Colen

José Antônio Frizzzone

Rafael Oliveira Batista

Rubens Duarte Coelho

**Data de defesa:** 17-02-2022

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Agrícola

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-6045-611>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7139076204275667>

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Gustavo Lopes Muniz**, aprovada pela Comissão Julgadora em 17 de Fevereiro de 2022, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

**FEAGRI**

---

**Prof. Dr. Antonio Pires de Camargo – Presidente e Orientador**

---

**Dr. Fernando Colen – Membro Titular**

---

**Dr. José Antônio Frizzone – Membro Titular**

---

**Dr. Rafael Oliveira Batista – Membro Titular**

---

**Dr. Rubens Duarte Coelho – Membro Titular**

**A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.**

## **Dedicatória**

*Aos meus pais, José Geraldo e Doralice,  
à minha irmã, Jeane,  
meu alicerce.*

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus, por me conceder saúde, persistência e sabedoria.

Aos meus pais e à minha irmã, pelo amor, apoio e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Antonio Pires de Camargo, pela orientação, ensinamentos, compreensão e confiança.

Ao Prof. Édson Eiji Matsura, pela oportunidade e acolhimento inicial, e a todos os Profs. que contribuíram para a minha formação ao longo do doutorado.

Aos amigos e companheiros de laboratório, em especial à Aline, Jones, Ana, Nicolás, Camila, Jhonnatan e Diego, por todos os momentos compartilhados.

Aos funcionários da FEAGRI, em especial ao Túlio, pelos momentos de descontração e ajuda; ao Giovani e ao Juninho, pelo suporte às atividades experimentais; à Valéria, sempre de prontidão para nos atender; ao Zé Maria e ao Luiz, pelo auxílio na usinagem dos protótipos.

Aos Profs. Gustavo Mockaitis e Zigomar, pelo uso das dependências dos laboratórios de Saneamento e de Solos.

Ao Prof. Celso Aparecido Bertran e ao Filipe Miranda, do Instituto de Química da UNICAMP, pelas ricas discussões acerca do tema e disponibilidade para sanar dúvidas.

Ao Prof. Antônio Carlos de Azevedo, do Laboratório de Mineralogia da ESALQ/USP, pelo auxílio com as análises de DRX.

À minha tia Edwrigens e ao meu padrinho Alessandro, pelo apoio e incentivo à pesquisa.

À Amanda, Cecília e Priscila, pela amizade, companheirismo e apoio, desde a graduação.

À UNICAMP e à FEAGRI, pelo suporte, infraestrutura e todo o apoio recebido nestes anos, que foram fundamentais para a realização da pesquisa e conclusão do doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento do Projeto de pesquisa (projeto nº 2018/20099-5).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo (88882.434695/2019-01) – Código de Financiamento 001.

Finalmente, a todos que participaram, de maneira direta ou indireta, para que essa pesquisa pudesse ser realizada.

## RESUMO

A obstrução de emissores em sistemas de irrigação por gotejamento é comumente relatada como um dos principais impasses para o uso deste sistema. A obstrução de emissores é influenciada pelas características da água e pelas configurações geométricas do labirinto. Agentes de natureza física, química e biológica são os principais responsáveis pelo entupimento de emissores e, muitas vezes, esses agentes podem se combinar levando à interrupção do fluxo de água, tornando mais complexo o entendimento dos processos de obstrução. Nesta pesquisa, objetivou-se estudar os processos de obstrução provocados por partículas de pequena granulometria ( $< 125 \mu\text{m}$ ) e precipitados de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), de modo isolados e combinados em diferentes condições. Protótipos de labirintos de gotejadores com diferentes configurações geométricas foram utilizados nos ensaios. Entre esses protótipos, nove apresentam configuração geométrica que favorecem a formação de zonas de vórtices de diferentes magnitudes durante o escoamento, e seis apresentam configuração geométrica que favorece escoamento uniforme no canal. Os ensaios foram conduzidos em laboratório sob condições controladas utilizando-se água calcária sintética com dureza de 200 e 300  $\text{mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  e concentração de partículas sólidas (PS) de 125 e 500  $\text{mg L}^{-1}$ . O tempo de ensaio foi de 200 h e, a cada 40 h, foi determinada a vazão relativa de cada modelo. Imagens do interior do labirinto foram obtidas utilizando-se uma câmera de alta resolução a fim de verificar os padrões de deposição. Testes de precipitação em béquer foram realizados a fim de esclarecer os mecanismos envolvidos na interação entre PS, solução e cristais de  $\text{CaCO}_3$ . A influência da concentração de PS no período de indução, taxa de precipitação e massa de  $\text{CaCO}_3$  formada foi estudada. Difração de raios-x e microscopia eletrônica de varredura foram empregadas a fim de analisar as fases cristalinas do material precipitado e as mudanças na morfologia do  $\text{CaCO}_3$  na presença de PS. Simulações de fluidodinâmica computacional foram realizadas para caracterizar o escoamento nos canais dos emissores. Nos ensaios apenas com PS, os resultados revelaram acúmulo de PS em 200 h de operação, porém não foi identificada variação de vazão dos emissores suficiente para classificá-los como obstruídos. Nos ensaios apenas com água calcária, gotejadores de escoamento uniforme foram sensíveis à deposição de  $\text{CaCO}_3$ , e obstruíram nas duas condições de dureza estudadas. Nos ensaios de interação, a adição de PS na água impactou a deposição de  $\text{CaCO}_3$  nos labirintos e, conseqüentemente, a vazão dos gotejadores, uma vez que foi observado que a quantidade de material depositado no labirinto diminuiu com o aumento da concentração de PS na água. Em termos de resistência à obstrução, as características geométricas dos labirintos foram dominantes em relação à qualidade da água, sendo a largura do canal e a área da seção de fluxo os parâmetros geométricos que mais

influenciaram na deposição nos labirintos. Finalmente, simulações de fluidodinâmica computacional foram úteis para antecipar zonas favoráveis à deposição e formação de incrustação e fornecer subsídios para o projeto de emissores.

**Palavras-chave:** microirrigação; incrustação química; obstrução de gotejador; fluidodinâmica computacional; qualidade da água.

## ABSTRACT

Emitters clogging in drip irrigation systems is commonly reported as one of the main drawbacks for the use of this type of system. Emitter's clogging is influenced by water characteristics and the geometric configurations of emitter labyrinths. Clogging agents can be classified as physical, chemical and biological agents and, many times, these agents can combine leading to interruption of the water flow, making the understanding of the clogging processes more complex. In this research, the objective was to study the clogging processes caused by particles of small particle size ( $< 125 \mu\text{m}$ ) and calcium carbonate scale ( $\text{CaCO}_3$ ), isolated and combined under different conditions. Drip maze prototypes with different geometric configurations were used in the tests. Among these prototypes, nine have a geometric configuration that favors the formation of vortex zones of different magnitudes during the flow, and six have a geometric configuration that favors uniform flow in the channel. The tests were carried out in laboratory under controlled conditions using synthetic limestone water with hardness of 200 and 300  $\text{mg L}^{-1}$  in  $\text{CaCO}_3$  and solid particles (SP) concentration of 125 and 500  $\text{mg L}^{-1}$ . The prototypes were operated for 200 h and, every 40 h, the relative flow rate of each model was determined. Images of the interior of the labyrinth were obtained using a high-resolution camera in order to verify the deposition patterns. Precipitation tests in beakers were carried out in order to clarify the mechanisms involved in the interaction between SP, solution and  $\text{CaCO}_3$  crystals. The influence of SP concentration on the induction period, precipitation rate and mass of  $\text{CaCO}_3$  scale was studied. X-ray diffraction and scanning electron microscopy were employed in order to analyze the crystalline phases of the precipitated material and changes in the morphology of  $\text{CaCO}_3$  in the presence of SP. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were performed to characterize the flow behavior within the emitter channels. In the tests only with SP, results revealed that accumulation of SP in 200 h of test did not cause changes in the flow rate of the emitters to classify them as clogged. In the tests with only calcareous water, drippers with uniform flow were sensitive to the  $\text{CaCO}_3$  scaling, and it clogged in the two hardness conditions studied. In the interaction tests, the addition of SP in water significantly impacted  $\text{CaCO}_3$  scaling in labyrinth and, consequently, the flow rate of the drippers, since it was observed that the amount of material deposited decreased with the increase of the SP concentration in water. In terms of clogging resistance, the geometric characteristics of the labyrinths were dominant in relation to water quality, with the width of the channel and the area of the flow section being the geometric parameters that significantly influenced the deposition in the labyrinths. Finally, computational fluid dynamics simulations were useful to anticipate favorable zones for deposition and fouling formation and provide subsidies for the design of emitters.

**Keywords:** micro-irrigation; chemical fouling; drip clogging; computational fluid dynamics; water quality.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Obstrução provocada por partículas grandes com bloqueio da passagem de água através do labirinto (a) e (b); obstrução provocada pelo acúmulo de partículas na entrada do labirinto do gotejador (c); obstrução provocada pela aglomeração de partículas finas (d); obstrução provocada por rebarba na seção de escoamento do labirinto, devido a imperfeições de fabricação (e); acúmulo de sedimentos próximo às zonas de estagnação do labirinto (f). Fonte: (LAVANHOLI, 2017; OLIVEIRA, 2017; TALAMINI JUNIOR, 2018).....28
- Figura 2.** Protótipos de labirinto e diferentes tratamentos para otimização de geometria. A seta indica a direção do fluxo de água. Fonte: adaptado de (FENG et al., 2018).....40
- Figura 3.** Distribuições de carga de pressão (m) ao longo do escoamento em canais retangulares (a), trapezoidais (b) e triangulares (c). Fonte: (WEI et al., 2006). .....42
- Figura 4.** Distribuições dos perfis de velocidade ( $m\ s^{-1}$ ) ao longo do escoamento em canais retangulares (a), trapezoidais (b) e triangulares (c). Fonte: (WEI et al., 2006).....43
- Figura 5.** Fresadora CNC utilizada para fabricação dos canais dos labirintos (a); e, protótipos de labirintos de gotejadores (b). Fonte: (LAVANHOLI, 2019).....46
- Figura 6.** Componentes do acessório para acoplamento dos protótipos de labirintos. (1) placa de acrílico com labirinto usinado; (2) borracha de silicone; (3) anel de vedação (o-ring); (4) engate de latão; (5) parafuso e porca para fixação do acessório na bancada de ensaio; (6) acessório de polipropileno; (7) parafuso e porca para fixação da placa de vidro; (8) placa de vidro.....47
- Figura 7.** Parâmetros estruturais do labirinto: largura do canal ( $W$ ), profundidade do canal ( $D$ ), altura do dente ( $H$ ) (a); perfil de distribuição das linhas de fluxo e da velocidade de escoamento para labirintos com largura do canal de 1 mm e com relação  $H/W$  de 1,0 (b), 1,2 (c) e 1,6 (d). Fonte: (LAVANHOLI, 2019).....48
- Figura 8.** Características geométricas do labirinto: largura do canal ( $W$ ), profundidade do canal ( $D$ ), ângulo do dente ( $\alpha$ ) (a); exemplo da estrutura do labirinto com largura de canal de 0,8 mm e ângulo de dente com  $75^\circ$  (b); perfil de distribuição das linhas de fluxo no escoamento para labirintos com ângulos de  $45^\circ$  (c),  $60^\circ$  (d) e  $75^\circ$  (e). Fonte: (LAVANHOLI, 2019). .....50
- Figura 9.** Esquema da bancada para ensaios de protótipos de gotejadores. (1) reservatório externo; (2) reservatório interno; (3) agitador mecânico; (4) válvula de pé; (5) tubulação de sucção; (6) conjunto motobomba; (7) tubulação de recalque; (8) manômetro; (9) protótipo de labirinto de gotejador acoplado no acessório de polipropileno; (10) aparato móvel para aquisição de imagens dos protótipos de gotejadores; (11) bocal para controle da velocidade de escoamento no tubo; (12) calha coletora para retorno da água ao reservatório; (13) bombas

peristálticas de injeção; (14) reservatórios de solução estoque; (15) coletores; (16) peneira para retenção de partículas contaminantes. ....	53
<b>Figura 10.</b> Bancada de ensaios com os protótipos de gotejador acoplados aos suportes, câmera para aquisição de imagens e reservatórios.....	54
<b>Figura 11.</b> Unidade de purificação de água: (1) filtro plissado 10” 5 µm; (2) filtro 10” de carvão ativado granular; (3) filtro 10” de polipropileno 1 µm; (4) bomba pressurizadora; (5) membrana de osmose reversa; e, (6) filtro 10” com resina mista. ....	55
<b>Figura 12.</b> Padrão de DR-x das partículas de solo utilizadas nos ensaios.....	56
<b>Figura 13.</b> (a) Valores de pH e de condutividade elétrica (CE) da água e (b) concentração de sólidos suspensos totais ao longo dos ensaios para avaliação da sensibilidade dos emissores à obstrução por PS.....	66
<b>Figura 14.</b> Vazão relativa dos protótipos de gotejadores ao longo do tempo em diferentes condições. (a) modelo A com 125 mg L <sup>-1</sup> de PS; (b) modelo B com 125 mg L <sup>-1</sup> de PS; (c) modelo A com 500 mg L <sup>-1</sup> de PS; (d) modelo B com 500 mg L <sup>-1</sup> de PS.....	68
<b>Figura 15.</b> Regiões de acúmulo de sedimentos no defletor e linhas de fluxo nos protótipos (a) A4, (b) A5 e (c) A6.....	71
<b>Figura 16.</b> Regiões de acúmulo de sedimentos no defletor e linhas de fluxo nos protótipos (a) B1, (b) B2 e (c) B3. ....	73
<b>Figura 17.</b> Padrão de deposição de PS e perfis de velocidade de escoamento nos modelos A9 (a) e B6 (b).....	74
<b>Figura 18.</b> Valores médios diários de: dureza e alcalinidade da água, nos tratamentos com água calcária com dureza de (a) 200 e (b) 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> ; concentração de íons cálcio, bicarbonato e carbonato, nos tratamentos com água calcária com dureza de (c) 200 e (d) 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> ; e, variação do pH e da CE da água, nos tratamentos com água calcária com dureza de (e) 200 e (f) 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> .....	75
<b>Figura 19.</b> Variação do ISL da água nos experimentos com água com dureza de 200 e 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> .....	76
<b>Figura 20.</b> Vazão relativa dos protótipos de gotejadores ao longo do tempo em diferentes condições. (a) modelo A com dureza de 200 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> ; (b) modelo B com dureza de 200 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> ; (c) modelo A com dureza de 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> ; (d) modelo B com dureza de 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> .....	78
<b>Figura 21.</b> Evolução da formação de depósito de CaCO <sub>3</sub> no labirinto do emissor: (a) emissor modelo A3 e (b) emissor modelo B6.....	80

<b>Figura 22.</b> Padrões de deposição e formação de incrustação de $\text{CaCO}_3$ e linhas de fluxo nos emissores no tratamento com água calcária com dureza de $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3$ . (a) e (c) emissor A7; (b) e (d) emissor A9; (e) e (g) emissor B1; (f) e (h) emissor B3.....	82
<b>Figura 23.</b> Depósitos de $\text{CaCO}_3$ (a) na saída e (b) na entrada do emissor Modelo B2.....	84
<b>Figura 24.</b> Difratogramas obtidos do $\text{CaCO}_3$ precipitado no interior dos labirintos utilizando água com dureza de (A) 300 e (B) $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3$ .....	85
<b>Figura 25.</b> Variação da dureza, alcalinidade, cálcio, bicarbonato, carbonato, pH e condutividade elétrica da água nos ensaios com gotejadores nas seguintes condições: (a) $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$ de PS; (b) $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$ de PS; (c) $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$ de PS; e, (d) $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$ de PS. ....	86
<b>Figura 26.</b> Variação do ISL da água nas seguintes condições: (C1) $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$ de PS; (C2) $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$ de PS; (C3) $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$ de PS; (C4) $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$ de PS. ....	87
<b>Figura 27.</b> Vazão relativa dos gotejadores operados com água com dureza de $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3$ e diferentes concentrações de PS. ....	89
<b>Figura 28.</b> Vazão relativa dos gotejadores operados com água com dureza de $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3$ e diferentes concentrações de PS. ....	91
<b>Figura 29.</b> Massa de $\text{CaCO}_3$ e PS depositada no labirinto dos protótipos de gotejadores nos tratamentos com água com dureza de (a) $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3$ e (b) $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3$ . ....	91
<b>Figura 30.</b> Dendograma do agrupamento dos protótipos de gotejadores. ....	92
<b>Figura 31.</b> Massa depositada em função da concentração de PS. (a) gotejadores do modelo A nas condições C1, C2 e C3; (b) gotejadores do modelo B nas condições C1, C2 e C3; (c) gotejadores modelo A nas condições C4, C5 e C6 (d) gotejadores modelo B nas condições C4, C5 e C6. ....	94
<b>Figura 32.</b> Locais de deposição de $\text{CaCO}_3$ e PS no modelo B6. (a) água com $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3$ , (b) água com $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$ de PS, (c) água com $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$ de PS.....	96
<b>Figura 33.</b> Locais de deposição de $\text{CaCO}_3$ e PS no modelo A9. (a) água com $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3$ , (b) água com $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$ de PS, (c) água com $200 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$ de PS, (d) água com $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3$ , (b) água com $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$ de PS, (c) água com $300 \text{ mg L}^{-1}$ em $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$ de PS. ....	97
<b>Figura 34.</b> Variação do pH, e taxas de decaimento das concentrações de cálcio e de bicarbonato e da condutividade elétrica (CE) da água nos ensaios em béquer. ....	101

<b>Figura 35.</b> Curva experimental de pH versus tempo para cada concentração de PS estudada. (a) Parâmetros da curva; (b) Resultados experimentais.....	102
<b>Figura 36.</b> (a) Taxa de formação de CaCO <sub>3</sub> em água calcária com diferentes concentrações de PS. (b) Massa de CaCO <sub>3</sub> precipitado calculada e pesada obtida no final dos ensaios em função da concentração de PS na água.....	106
<b>Figura 37.</b> Padrões de DR-x das amostras coletadas nos labirintos de gotejadores nas seguintes condições: (a) 200 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> , (b) 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> (c) 200 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> + 125 mg L <sup>-1</sup> de PS (d) 200 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> + 500 mg L <sup>-1</sup> de PS (e) 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> + 125 mg L <sup>-1</sup> de PS (f) 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> + 500 mg L <sup>-1</sup> de PS.....	108
<b>Figura 38.</b> Morfologia do CaCO <sub>3</sub> nas seguintes condições: (a) 200 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> ; (b) 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> (c) 200 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> + 125 mg L <sup>-1</sup> de PS; (d) 200 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> + 500 mg L <sup>-1</sup> de PS; (e) 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> + 125 mg L <sup>-1</sup> de PS; (f) 300 mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> + 500 mg L <sup>-1</sup> de PS.....	111

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Principais parâmetros da água a serem analisados para se projetar sistemas de irrigação localizada.....	25
<b>Tabela 2.</b> Principais agentes físicos, químicos e biológicos de obstrução de emissores .....	25
<b>Tabela 3.</b> Escala de classificação do grau de restrição do uso da água para a irrigação localizada .....	26
<b>Tabela 4.</b> Características geométricas dos protótipos de labirintos com zonas de vórtice: largura do canal ( $W$ ), altura do dente ( $H$ ), área da seção de fluxo ( $A$ ), coeficiente de perda de carga ( $\phi$ ), número de defletores ( $N$ ) e comprimento do labirinto ( $L$ ).....	48
<b>Tabela 5.</b> Representação dos protótipos modelo A .....	49
<b>Tabela 6.</b> Características geométricas dos protótipos de labirintos com zonas mínimas de vórtice: largura do canal ( $W$ ), profundidade do canal ( $D$ ), altura do dente ( $H$ ), ângulo do dente ( $\alpha$ ), área da seção de fluxo ( $A$ ), coeficiente de perda de carga ( $\phi$ ), número de defletores ( $N$ ) e comprimento do labirinto ( $L$ ) .....	51
<b>Tabela 7.</b> Representação dos protótipos modelo B.....	51
<b>Tabela 8.</b> Principais parâmetros químicos do solo .....	56
<b>Tabela 9.</b> Condições de ensaio com protótipos de labirintos na condição de interação.....	60
<b>Tabela 10.</b> Parâmetros obtidos a partir da curva de pH versus tempo em função da concentração de PS na água.....	102

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1 Irrigação por gotejamento.....	21
2.2 Emissores.....	21
2.3 Obstrução de emissores em sistemas de irrigação por gotejamento.....	24
2.4 Obstrução de emissores por agentes de natureza física.....	27
2.5 Obstrução de emissores por precipitados de carbonato de cálcio (CaCO <sub>3</sub> ).....	29
2.6 Obstrução de emissores por interação entre agentes de natureza física e precipitados de carbonato de cálcio 33	
2.7 Nucleação e crescimento de cristais.....	35
2.8 Características geométricas de labirintos e obstrução de emissores.....	38
2.9 Fluidodinâmica computacional.....	41
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.1 Protótipos de gotejadores avaliados.....	44
3.1.1 Emissores modelo A.....	48
3.1.2 Emissores modelo B.....	49
3.2 Ensaio de obstrução.....	52
3.2.1 Bancada de ensaios.....	52
3.2.2 Água utilizada nos ensaios.....	54
3.2.3 Avaliação da sensibilidade de emissores à obstrução por partículas sólidas (PS).....	55
3.2.4 Avaliação da sensibilidade de emissores à obstrução por precipitados de carbonato de cálcio.....	57
3.2.5 Avaliação da sensibilidade de emissores à obstrução por interações entre partículas sólidas e precipitados de carbonato de cálcio.....	60
3.2.6 Rotinas de ensaio.....	61
3.3 Avaliação de desempenho dos protótipos de emissor.....	61

3.4 Análises físico-químicas .....	62
3.4.1 Determinações analíticas .....	62
3.4.2 Difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura .....	63
3.5 Mecanismos de interação e cinética de precipitação .....	63
3.6 Simulação utilizando fluidodinâmica computacional.....	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
4.1 Obstrução por partículas sólidas .....	65
4.1.1 Desempenho dos protótipos de labirintos.....	65
4.1.2 Padrões de deposição de PS.....	70
4.2 Obstrução por precipitados de CaCO <sub>3</sub> .....	74
4.2.1 Desempenho dos protótipos de labirintos.....	74
4.2.2 Padrões de deposição de CaCO <sub>3</sub> .....	80
4.3 Obstrução por interação entre partículas sólidas e precipitados de CaCO <sub>3</sub> .....	85
4.3.1 Desempenho dos protótipos de labirintos.....	85
4.3.2 Padrões de deposição .....	96
4.3.3 Mecanismos de interação.....	99
4.4 Análise do material de obstrução.....	107
4.4.1 Difração de raios-x .....	107
4.4.2 Microscopia eletrônica de varredura .....	109
5 CONCLUSÕES .....	113
REFERÊNCIAS .....	115

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de irrigação pressurizados, em especial os sistemas de irrigação por gotejamento, destacam-se por possibilitar elevada eficiência do uso da água. Entretanto, em sistemas de irrigação por gotejamento, a obstrução de emissores é relatada como um dos principais problemas enfrentados por irrigantes, principalmente quando águas de baixa qualidade ou emissores sensíveis à obstrução são utilizados, o que tem restringido a aplicação e ampliação do método de irrigação localizada.

A obstrução de emissores está diretamente relacionada à qualidade da água de irrigação e aos parâmetros geométricos do labirinto dos emissores. A qualidade da água é influenciada por variáveis físicas, químicas e biológicas, que estão relacionadas à concentração de partículas em suspensão, composição química da água e população microbiana, respectivamente. Esses agentes, por sua vez, são reportados na literatura como sendo os principais responsáveis pela obstrução de emissores, podendo agir de forma isolada ou combinados (GILBERT et al., 1981; NAKAYAMA; BOMAN; PITTS, 2007).

Em relação à dimensão e à geometria de labirintos, ressalta-se que, nos projetos de labirintos de emissores, busca-se agrupar características que assegurem bom desempenho hidráulico e resistência à obstrução. O desempenho hidráulico satisfatório geralmente é obtido pelo projeto de emissores que operam em fluxo turbulento. Em tais condições hidrodinâmicas, a vazão, praticamente, não é influenciada por efeitos de temperatura e não é tão sensível à variação de pressão do sistema. A formação de vórtices ao longo do percurso de escoamento de labirintos de fluxo turbulento é comum, visto que os vórtices caracterizam um mecanismo eficaz de dissipação de energia e desempenham um papel importante no controle da vazão desses gotejadores. A presença de vórtices ao longo do labirinto provoca o estreitamento da seção de fluxo principal no centro do labirinto, aumentando a perda de carga e permitindo a construção de labirintos com seção de escoamento maior, percurso mais curto, resultando em emissores de formato mais compacto. Por outro lado, o centro de vórtices e zonas de estagnação são regiões com baixa velocidade de escoamento, suscetíveis à deposição e ao acúmulo de partículas e, conseqüentemente, as partículas sedimentadas tendem a reduzir a seção de escoamento, interrompendo a passagem de água e provocando alteração na vazão do gotejador.

Nos sistemas de irrigação, a filtragem apropriada ajuda a prevenir problemas de obstrução de emissores causados por partículas orgânicas e inorgânicas. Idealmente, todos os sólidos suspensos deveriam ser removidos pelo sistema de filtragem, porém, devido às limitações práticas e econômicas, apenas as partículas maiores são removidas. As partículas menores atravessam o sistema de filtragem e atingem outros componentes do sistema de

irrigação, sendo comum que haja o acúmulo de quantidades significativas de sedimentos nos finais de linhas.

Assim como partículas de pequena granulometria, substâncias químicas dissolvidas na água também não são retidas nos filtros comumente utilizados em sistemas de irrigação. Esses íons, em condição de supersaturação e pH alcalino formam precipitados de baixa solubilidade, caracterizados por depósitos/incrustação, restringindo a passagem da água e influenciando a vazão dos emissores. Entre os precipitados químicos, o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) é um dos mais comuns encontrados nos labirintos de gotejadores (EROGLU et al., 2012). Na maioria dos casos, a obstrução do emissor não ocorre devido à ação individual de agentes físico, químico ou biológico, eles geralmente interagem entre si levando à obstrução do emissor (LI et al., 2019a). Mecanismos de obstrução por interação são pouco relatados na literatura, e seu entendimento é mais complexo.

Existe grande diversidade de formatos e dimensões (características geométricas) de labirintos de gotejadores comerciais e, embora muitos dos modelos de gotejador apresentem desempenho hidráulico apropriado, pouco se sabe sobre o desempenho dos emissores em termos de resistência à obstrução. Portanto, evidencia-se a necessidade de realização de pesquisas visando a compreensão da relação entre características geométricas de gotejadores e a dinâmica da obstrução, a fim de que seja possível identificar modelos comerciais mais resistentes à obstrução, promover a inovação e o desenvolvimento de gotejadores de melhor desempenho para operação com águas de baixa qualidade. O entendimento sobre como as características geométricas de gotejadores influenciam na resistência à obstrução e nos padrões de transporte e acúmulo de sedimentos no interior dos labirintos ainda é insuficiente. As principais dificuldades em se obter essas informações estão associadas à complexidade das interações entre parâmetros de qualidade da água, geometria de emissores e processos de obstrução.

Nesta pesquisa, foram levantadas as seguintes hipóteses: (1) problemas de obstrução de emissores são mais severos por precipitados de carbonato de cálcio podem ser atenuados na presença de partículas sólidas. Sendo assim, supõe-se que processos de deposição e formação de incrustação nos labirintos de gotejadores são influenciados por interações entre carbonato de cálcio e partículas sólidas que atravessam o sistema de filtragem; (2) a presença de partículas sólidas na água influencia a taxa de formação e crescimento de cristais de carbonato de cálcio, diminuindo a velocidade de formação e a morfologia dos cristais; (3) regiões de baixa velocidade no labirinto favorecem o acúmulo de partículas e depósitos de carbonato de cálcio, podendo favorecer a interrupção do fluxo de água, desse modo, supõe-se

que, para atenuar problemas de obstrução de gotejadores é preciso diminuir as zonas de baixa velocidade; (4) os parâmetros geométricos da seção de escoamento do labirinto são os principais fatores que afetam a deposição e, conseqüentemente, a obstrução de emissores; assim, labirintos cuja seção de escoamento é maior são mais resistentes à obstrução, mesmo apresentando zonas de vórtices bem desenvolvidas; (5) simulações de fluidodinâmica computacional são úteis para antecipar a identificação de zonas do labirinto com características de fluxo indesejadas, do ponto de vista de resistência à obstrução.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo investigar processos de obstrução causados por carbonato de cálcio e partículas de pequena granulometria, bem como, identificar como as características geométricas e hidrodinâmicas de gotejadores influenciam na resistência à obstrução, nos padrões de transporte e acúmulo de sedimentos e na deposição e formação de incrustação no interior dos labirintos. Como objetivo secundário, investigou-se o uso de fluidodinâmica computacional para simulações de escoamento no interior dos labirintos, confrontando perfis de linhas de fluxo obtidos nas simulações com os padrões de deposição nos labirintos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Irrigação por gotejamento

A irrigação por gotejamento é um importante sistema de aplicação de água, que se caracteriza por fornecer água a baixa vazão ( $2 - 20 \text{ L h}^{-1}$ ) e alta frequência diretamente na zona radicular das culturas. O sistema apresenta uma rede de tubos de plástico equipados com gotejadores, distribuídos por toda a área irrigada, e é adaptável a qualquer declividade cultivável (FRIZZONE et al., 2012; ZHANG et al., 2017).

A irrigação por gotejamento é proposta como uma das tecnologias de irrigação mais eficientes quanto ao uso da água e fertilizantes, pois permite aplicar água e nutrientes diretamente na zona radicular da cultura de maneira uniforme e precisa, atendendo, assim, as necessidades hídricas e nutricionais da cultura de maneira oportuna e apropriada, reduzindo significativamente a evaporação da superfície do solo (BAI; KANG; WAN, 2020). Devido aos recursos hídricos limitados, a irrigação por gotejamento está recebendo mais atenção e desempenhando um papel importante na produção agrícola. Portanto, o uso de sistemas de irrigação por gotejamento está aumentando rapidamente em todo o mundo (ŞAHIN et al., 2005).

A implementação da irrigação por gotejamento certamente resultou em benefícios revolucionários. Durante os últimos anos, muitos pesquisadores se concentraram em estudar seus efeitos, benefícios e melhorias, de modo a aprimorar os parâmetros gerais, resultando em uma análise aprofundada dessa tecnologia (BANSAL et al., 2021). Contudo, o elevado custo de aquisição desse sistema, maior demanda de conhecimento técnico para operação/manutenção e a exigência de utilização de água de boa qualidade tem sido fatores limitantes para a expansão das áreas irrigadas por gotejamento (FRIZZONE et al., 2012).

### 2.2 Emissores

Os emissores, ou gotejadores, são um dos componentes mais importantes de um sistema de irrigação por gotejamento, e desempenham um papel crucial (ZHANG et al., 2017). Os emissores são utilizados para dissipar a energia de pressão e controlar a descarga de água da linha lateral para a planta. Normalmente, são espaçados uns dos outros de 0,2 a 1,0 m, sendo que o espaçamento depende de diversos fatores, como características do solo, espaçamento entre plantas e vazão do emissor. Esses dispositivos são projetados para fornecerem vazões relativamente baixas, geralmente inferior a  $4 \text{ L h}^{-1}$ , e operam sob pressão na faixa de 50 e 450 kPa.

Trabalhos reportados na literatura mostram que nos projetos de emissores busca-se aprimorar dois principais aspectos: desempenho hidráulico e resistência à obstrução (PATIL; NIMBALKAR; JOSHI, 2013; ZHANG et al., 2007, 2011). O desempenho hidráulico de um emissor é avaliado pela relação entre a vazão emitida e a pressão de operação (KELLER; KARMELI, 1974), que pode ser representada por uma função potencial (Eq. 1), indicando a tendência da curva vazão-pressão característica do emissor.

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

Onde  $q$  é a vazão do emissor ( $L h^{-1}$ );  $k$  é o coeficiente de proporcionalidade;  $H$  é a carga de pressão de operação do emissor (m); e  $x$  é o expoente de fluxo, índice utilizado para avaliar o desempenho hidráulico do emissor (LI et al., 2006; MADRAMOOTOO; KHATRI; RIGBY, 1988; ZHANG et al., 2011). Quanto menor o valor de  $x$ , melhor o desempenho hidráulico do emissor, sendo que valores próximos a 0,5 são típicos em emissores de fluxo turbulento.

Emissores com canais do tipo labirinto são amplamente utilizados devido às suas estruturas simples e baixo custo. O labirinto é responsável por dissipar a carga de pressão e permitir a saída da água de maneira lenta e uniforme e, por apresentarem pequenas dimensões, são facilmente obstruídos. As dimensões e geometria do labirinto são determinantes para o desempenho dos emissores (ZHANG et al., 2011).

A literatura técnica na área de Engenharia de Irrigação quase não menciona critérios ou requisitos associados à concepção de gotejadores visando desempenho em termos de resistência à obstrução. Comercialmente, tem-se observado a tendência de uso de emissores integrados aos tubos de polietileno, sendo que os emissores do tipo plano (pastilha) e do tipo cilíndrico (bóbi) são os mais comuns. No Brasil, emissores do tipo plano são bastante utilizados em fitas gotejadoras e tubo-gotejadores de parede fina e, muitas vezes, são comercializados com menor custo e com expectativa de vida útil menor. Por outro lado, há indícios de que emissores cilíndricos apresentam maior resistência à obstrução por apresentarem seção de escoamento maior e, conseqüentemente, maior capacidade de transporte de sedimentos suspensos na água de irrigação.

Algumas pesquisas têm investigado a configuração geométrica do labirinto de emissores em termos de desempenho hidráulico, enquanto outras investigaram a sensibilidade do labirinto em termos de obstrução, individualmente. Por exemplo, o fluxo em canais de labirinto foi simulado utilizando fluidodinâmica computacional (CFD) para calcular as distribuições de pressão e velocidade do fluxo, e para calcular a relação entre pressão e vazão para canais de labirintos de três formatos: triangular, retangular e trapezoidal (WEI et al.,

2006). Os resultados mostraram que o canal triangular apresentou maior eficiência de dissipação de energia hidráulica. Em outra pesquisa, vórtices de canais de labirintos foram estudados e caracterizados através de experimentação e simulações computacionais visando entender seu papel nas condições de escoamento e desempenho anti-obstrução (AL-MUHAMMAD et al., 2018). De acordo com os autores, a jusante do defletor existe uma região de vórtice de fraca intensidade em comparação com o fluxo principal. Esses vórtices são gerados pela mudança de direção do fluxo e, nessas regiões, há intensa deposição de partículas e desenvolvimento de agentes biológicos e químicos causadores de entupimento do gotejador.

Modelos matemáticos de previsão de vazão em canais de labirinto em função de sua geometria, visando a previsão rápida das curvas vazão-pressão, foram propostos por Lavanholi et al. (2020). Um modelo matemático empírico foi desenvolvido com base em regressão não linear, e um modelo computacional foi treinado com base em redes neurais artificiais. Além disso, um aplicativo web de código aberto foi desenvolvido para simular a curva vazão-pressão de labirintos de gotejadores dentro de uma gama de características geométricas e operacionais. O modelo de regressão não linear obtido apresentou desempenho satisfatório e inclui as características geométricas do labirinto e a perda de carga de pressão operacional (Eq. 2):

$$q = 0,4041 \left( \frac{H}{W} \right)^{0,0115} \frac{\alpha^{0,5903}}{L^{0,0014} (WD)^{0,0285}} h^{[0,5412(1/\alpha)^{0,4025}]} \quad (2)$$

onde:  $q$  = vazão do emissor ( $L h^{-1}$ );  $H$  = altura do dente (mm);  $W$  = largura do canal (mm);  $L$  = comprimento do labirinto (mm);  $\alpha$  = ângulo do dente (rad);  $D$  = profundidade do canal (mm); e  $h$  = carga de pressão na entrada do labirinto (m). A equação (2) é válida para labirintos trapezoidais com seções de fluxo retangulares e foi ajustada com base em dados experimentais dentro dos seguintes intervalos:  $45 \leq \alpha \leq 75^\circ$ ,  $5 \leq h \leq 35$  m,  $0,5 \text{ mm} \leq W \leq 1,3 \text{ mm}$ ,  $0,7 \text{ mm} \leq H \leq 2,08 \text{ mm}$ ,  $15,8 \text{ mm} \leq L \leq 888,42 \text{ mm}$  e  $0,5 \text{ mm} \leq D \leq 0,8 \text{ mm}$  (LAVANHOLI et al., 2020).

O desempenho hidráulico de gotejadores do tipo labirinto não compensantes foi avaliado em diferentes declividades de linhas laterais operando com águas de diferentes qualidades (SZEKUT et al., 2018). Os autores concluíram que o uso de águas com fertilizantes químicos, água residuária de fécula de mandioca e de abatedouro comprometeram o desempenho dos emissores, independente da variação de pressão proporcionada pela declividade da linha lateral. Em outro estudo, gotejadores de diferentes vazões (1,65; 2,0 e 4,0  $L h^{-1}$ ) foram utilizados em experimentos com percolado de aterro sanitário diluído em água, operando sob diferentes pressões (70, 140, 210 e 280 kPa). Os resultados mostraram que os

fatores vazão e pressão de operação foram significativos no desempenho anti-obstrução dos emissores, sendo que os emissores com maior vazão foram os que obtiveram melhor desempenho nas pressões de 70 e 140 kPa, demonstrando que a seção de escoamento, de fato, é o parâmetro geométrico dominante no processo (VALE et al., 2018).

### **2.3 Obstrução de emissores em sistemas de irrigação por gotejamento**

Em sistemas de irrigação por gotejamento, o entupimento do emissor tem sido frequentemente relatado como um inconveniente e um dos principais problemas recorrentes nesse tipo de sistema, tendo como consequência a redução da vazão e da uniformidade de distribuição de água, a diminuição da vida útil do sistema de irrigação e impactos negativos no rendimento e desenvolvimento das culturas (CAPRA; SCICOLONE, 1998; HILLS; NAWAR; WALLER, 1989; NAKAYAMA; BOMAN; PITTS, 2007; PUIG-BARGUÉS et al., 2010). A obstrução parcial e total dos emissores está relacionada à qualidade da água de irrigação e ocorre como resultado de agentes físicos (principalmente silte e argila), biológicos (algas e bactérias) e químicos (precipitado de carbonato de cálcio, compostos de fosfato de cálcio, óxido de ferro, entre outros) presentes na água de irrigação (GILBERT et al., 1981; GOYAL; CHAVAN; TRIPATHI, 2016; LAMM; AYARS; NAKAYAMA, 2006; NAKAYAMA; BUCKS, 1986; ŞAHIN et al., 2005).

Como forma de prevenção da obstrução de emissores, são utilizados sistemas de filtragem e, em alguns casos, tratamento químico da água, a depender da qualidade da mesma. Um sistema de filtragem adequado contribui para a remoção de material particulado suspenso na água de irrigação, reduzindo o risco de obstrução de emissores e prolongando a vida útil do sistema. Uma filtragem adequada da água é essencial e ajuda a proteger todos os componentes do sistema. A seleção adequada de um filtro envolve levar em consideração os tipos de contaminantes encontrados na fonte de água, a frequência e a disponibilidade do serviço de manutenção do filtro, além do tipo de dispositivos de emissão utilizados no sistema de irrigação. Como recomendação geral para irrigação localizada, utilizam-se filtros de areia (filtragem primária) seguidos por filtros de discos ou tela (filtragem secundária ou de segurança) (DURAN-ROS et al., 2009; GILBERT et al., 1981; GOYAL; CHAVAN; TRIPATHI, 2016).

Para se projetar o sistema de filtragem e verificar a necessidade de tratamento químico da água, recomenda-se fazer análise completa da água que será utilizada no sistema de irrigação. Na Tabela 1 são indicados os principais parâmetros que devem ser incluídos na análise da água.

**Tabela 1.** Principais parâmetros da água a serem analisados para se projetar sistemas de irrigação localizada

Íons inorgânicos*	Ácido sulfídrico
Dureza total	Algas
Sólidos suspensos totais (SST)	Contagem de bactérias
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	Ferro-bactérias
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	Bactérias redutoras de sulfato
Demanda química de oxigênio (DQO)	pH
Oxigênio dissolvido (OD)	Condutividade elétrica

\* cálcio, magnésio, ferro, manganês, sódio, potássio, carbonatos, bicarbonatos, cloretos, sulfatos, nitrogênio amoniacal, nitrato e fosfato. Fonte: adaptado de (AYERS; WESTCOT, 1985) e (CABELLO, 1996).

Vale destacar que os sistemas de filtragem não são efetivos para eliminação de substâncias dissolvidas presentes na água. Além das substâncias dissolvidas, as partículas sólidas de granulometria inferior à malha de filtragem também não são retidas nos filtros, e atingem os componentes do sistema de irrigação, podendo se acumular gradualmente nas tubulações e aglomerar nos labirintos, interrompendo o fluxo de água (CAPRA; SCICOLONE, 1998). Além das partículas de granulometria inferior à malha de filtragem, partículas cujo formato é irregular, por exemplo, partículas estreitas e alongadas, podem passar pelo sistema de filtragem, em função da turbulência típica das condições de escoamento, e atingir os emissores. A Tabela 2 resume os principais elementos presentes na água que, ocasionalmente, provocam a obstrução de emissores.

**Tabela 2.** Principais agentes físicos, químicos e biológicos de obstrução de emissores

Físicos (sólidos em suspensão)	Químicos (precipitados)	Biológicos (bactérias e algas)
Areia	Carbonatos de cálcio e magnésio	Filamentos
Silte	Sulfato de cálcio	Mucilagem
Argila	Hidróxidos e sulfetos de metais	Limo de ferro, enxofre e manganês de origem microbiana
Plástico	Óleos e lubrificantes	
Plantas aquáticas	Fertilizantes	
Animais aquáticos	Óxidos	

Fonte: Adaptado de (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979).

Embora não exista um método de avaliação da qualidade da água que seja capaz de prever com exatidão a ocorrência ou não da obstrução de emissores, é possível encontrar na literatura valores de referência para determinados parâmetros que indicam o grau de restrição

de uso da água ou o grau de risco de obstrução, considerando o entupimento de emissores (Tabela 3). Vale ressaltar que esses valores foram determinados em estudos, normalmente, limitados a determinadas condições, e que nem sempre esses valores refletem a realidade, uma vez que a obstrução ocorre pela ação de diversos fatores agindo em concomitância. Além disso, devem ser consideradas na avaliação do grau de risco de obstrução as condições locais, como temperatura da água e características geométricas dos emissores (DUARTE, 2010).

**Tabela 3.** Escala de classificação do grau de restrição do uso da água para a irrigação localizada

Parâmetros	Grau de restrição			Referência
	Nenhuma	Moderada	Severa	
Sólidos suspensos (mg L <sup>-1</sup> )	<50	50 – 100	>100	(BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979)
pH	<7,0	7,0 – 8,0	>8,0	(BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979)
Dureza total (mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> )	<150	150 – 300	>300	(GOYAL; CHAVAN; TRIPATHI, 2016)
Ferro (mg L <sup>-1</sup> )	<0,2	0,2 – 1,5	>1,5	(BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979)
Manganês (mg L <sup>-1</sup> )	<0,1	0,1 – 1,5	>1,5	(BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979)
Bicarbonato (mg L <sup>-1</sup> )	<91,5	91,4 – 518,5	>518,5	(AYERS; WESTCOT, 1985)
Carbonato (mg L <sup>-1</sup> )	<6,0	6,0 – 12,0	>12,0	(ANDRADE JÚNIOR et al., 2006)
Sólidos dissolvidos (mg L <sup>-1</sup> )	<500,0	500,0 – 2000,0	>2000,0	(BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979)
Condutividade elétrica (dS m <sup>-1</sup> )	<0,7	0,7 – 3,0	>0,3	(AYERS; WESTCOT, 1985)
Sulfeto de hidrogênio (mg L <sup>-1</sup> )	<0,2	0,2 – 2,0	>2,0	(BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979)
Número de bactérias (n° mL <sup>-1</sup> )	<10000	10000 – 50000	>50000	(BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979)
Índice de Saturação de Langelier (ISL) (adimensional)	<0,2	0,2 – 0,5	>0,5	(RICHTER, 2009)

Vale destacar, na Tabela 3, que o parâmetro dureza total, de modo isolado, não indica o risco de precipitação do CaCO<sub>3</sub>. A formação do precipitado é dependente das concentrações de carbonato e de bicarbonato no meio, além de requerer pH alcalino para que a reação aconteça. A concentração de sólidos dissolvidos e a temperatura da água também interferem diretamente na formação desse sal. Desse modo, para avaliar o risco de precipitação do CaCO<sub>3</sub>, deve-se recorrer a índices de saturação, que englobam todos esses parâmetros e preveem o risco de precipitação com base no conceito de saturação. O mais utilizado é o Índice

de Saturação de Langelier (ISL). Valores negativos de ISL indicam tendência da água ser corrosiva, valores iguais a zero ou menor que 0,2 indicam que a água está em equilíbrio com relação ao  $\text{CaCO}_3$  e que não há risco de precipitação, já valores maiores que 0,2 indicam risco de precipitação desse mineral (LANGELIER, 1936, 1946; RICHTER, 2009).

Além do sistema de filtragem, é indicado o tratamento químico para águas cujo valor de pH é maior que 7,00. Normalmente, a injeção de ácidos para manter o pH levemente ácido (pH entre 6,0 e 6,5) é indicado. A injeção de ácidos poderá ser feita de modo contínuo ou intermitente, e a quantidade do ácido a ser injetada depende da alcalinidade da água e poderá ser obtida a partir de uma curva de titulação da água que será usada no sistema de irrigação (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979; GILBERT et al., 1981; NAKAYAMA; BUCKS; FRENCH, 1977).

#### **2.4 Obstrução de emissores por agentes de natureza física**

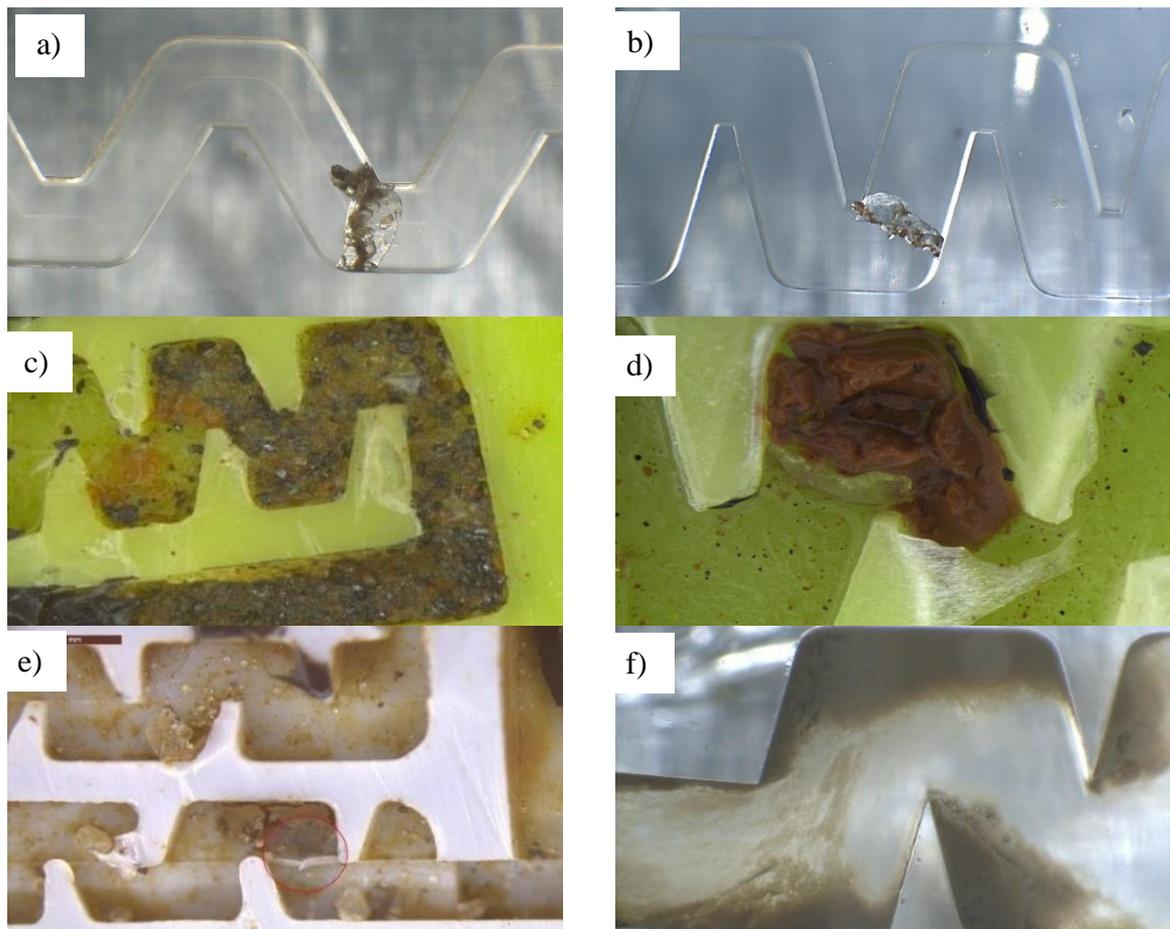
Em termos de qualidade da água, o potencial de obstrução por partículas sólidas suspensas na água de irrigação é influenciado principalmente pela concentração e granulometria de partículas (LAVANHOLI, 2017; OLIVEIRA, 2017; PERBONI, 2016; PEREIRA, 2019; TALAMINI JUNIOR, 2018). A complexidade aumenta ao analisar processos de obstrução causados por partículas de menor granulometria (argila, silte e areia fina), que atravessam os sistemas de filtragem usualmente empregados em microirrigação (AIT-MOUHEB et al., 2019). Embora essas partículas sejam aparentemente pequenas para proporcionar a obstrução, sob dadas condições físico-químicas e hidrodinâmicas, é possível que ocorra a aglomeração de partículas após o sistema de filtragem e a consequente obstrução de emissores (THILL et al., 2001; NIU et al., 2012; BOUNOUA et al., 2016; LAVANHOLI, 2017; OLIVEIRA, 2017; FENG et al., 2019).

A formação de agregados em misturas com partículas suspensas e em condição hidrostática depende da natureza das partículas, concentração de eletrólitos (sais) e pH da mistura (HUNTER, 1994; NIU et al., 2012; BOUNOUA et al., 2016; OLIVEIRA, 2017). Quando tais misturas são submetidas à condição hidrodinâmica, a turbulência torna-se mais um fator no processo de agregação (BOUNOUA et al., 2016; HUNTER, 1994; OLIVEIRA, 2017), pois influencia na colisão entre partículas e na formação de agregados (THILL et al., 2001).

Pesquisas conduzidas recentemente permitiram observar padrões de obstrução ou acúmulo de sedimentos no interior de labirintos de gotejadores não regulados (Figura 1) (LAVANHOLI, 2017; OLIVEIRA, 2017; PERBONI, 2016; PEREIRA, 2019; TALAMINI JUNIOR, 2018). Tais observações servem como diagnóstico do modo como ocorre a obstrução

no interior de labirintos e podem ser úteis para aprimorar as características geométricas de gotejadores.

Oliveira (2017) avaliou o potencial de formação de agregados e o risco de obstrução provocado por partículas de argila, isoladamente. Não foi evidenciada a formação de grandes aglomerados como o mostrado na Figura 1d, sendo então suposto que tais aglomerados são formados por interações entre partículas de argila, silte e, eventualmente, areia fina. As partículas de argila estão sujeitas a fenômenos de autolimpeza que ocorrem no interior dos labirintos devido aos ciclos de partida e desligamento do sistema de bombeamento (OLIVEIRA, 2017). Em relação à deposição de partículas, pode-se afirmar que as partículas de argila tendem a se depositar principalmente nas regiões de vórtices e de estagnação, localizadas nos dois primeiros defletores dos labirintos. Além disso, por não ocorrer acúmulo de partículas na região do fluxo principal, sugere-se que partículas de argila, isoladamente, não apresentam potencial para causar obstrução completa dos gotejadores (OLIVEIRA, 2017).



**Figura 1.** Obstrução provocada por partículas grandes com bloqueio da passagem de água através do labirinto (a) e (b); obstrução provocada pelo acúmulo de partículas na entrada do labirinto do gotejador (c); obstrução provocada pela aglomeração de partículas finas (d);

obstrução provocada por rebarba na seção de escoamento do labirinto, devido a imperfeições de fabricação (e); acúmulo de sedimentos próximo às zonas de estagnação do labirinto (f).  
Fonte: (LAVANHOLI, 2017; OLIVEIRA, 2017; TALAMINI JUNIOR, 2018).

Bounoua et al. (2016) conduziram experimentos em campo e em laboratório, e utilizaram CFD a fim de entender os mecanismos de obstrução de gotejadores por partículas sólidas. Os resultados mostraram que partículas de argila afetaram a vazão dos emissores, independentemente de seu tamanho. Sendo assim, os autores supõem que há uma interação entre a turbulência do escoamento com as partículas presentes na água. Também foi verificado que o aumento da concentração de sal na água, contendo argila do tipo esmectita, diminuiu a obstrução do emissor, porém, aumentou o tamanho dos aglomerados formados, uma vez que a carga elétrica das argilas, na presença de sal, favorece o processo de aglomeração. As simulações computacionais mostraram que as partículas de argila interagindo com o fluxo governam a estrutura complexa dos campos de velocidade do fluido dentro do canal do labirinto do gotejador, sendo obtidas as seguintes conclusões: 1) a injeção de partículas inertes reduziu a velocidade geral da água e a energia cinética turbulenta da mistura no fluxo, bem como, a turbulência do fluxo (diminuição do número de Reynolds); (2) o tamanho da partícula inerte não afetou a velocidade da água nem a energia cinética turbulenta e, portanto, não modificou a taxa de fluxo; no entanto, as partículas não foram distribuídas da mesma maneira no fluxo; (3) a massa de partículas (na faixa estudada) não influenciou a velocidade da água, mas aumentou a energia cinética turbulenta na zona de recirculação; e, finalmente, (4) os mecanismos de aglomeração e desagregação influenciaram a turbulência, o que resultou na diminuição da velocidade.

## **2.5 Obstrução de emissores por precipitados de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ )**

O  $\text{CaCO}_3$  é um dos precipitados químicos mais comuns encontrados em labirintos de emissores de sistemas de irrigação por gotejamento (EROGLU et al., 2012; LI et al., 2013a, 2019b; LILI et al., 2019; ZHOU et al., 2019b). A obstrução por precipitados químicos é causada por materiais insolúveis gerados a partir de reações químicas entre cátions ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ , etc.) e ânions ( $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_3^{-2}$ , etc.) presentes na água de irrigação (LILI et al., 2016; RIZK et al., 2017). Problemas de obstrução devido a precipitados de  $\text{CaCO}_3$  são relatados em regiões de São Paulo, no norte de Minas Gerais e em parte do nordeste do Brasil (DUARTE, 2010; LEITE, 1995; MAIA; MORAIS; OLIVEIRA, 2001; MELO; COELHO; TEIXEIRA, 2008).

A compreensão do sistema carbonato é fundamental para o entendimento dos processos ligados à corrosão e incrustação envolvendo a saturação do carbonato de cálcio (RICHTER, 2009), assim como, para o entendimento de processos de obstrução em emissores utilizados em irrigação. O dióxido de carbono ou ácido carbônico, os carbonatos e bicarbonatos constituem os principais componentes do sistema carbonato. A solubilidade do  $\text{CO}_2$  em água é descrita pela Lei de Henry e, quando dissolvido na água, forma o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) que é um ácido fraco e se dissocia formando o íon bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) (RICHTER, 2009; STUMM; MORGAN, 1996). Sob valores de pH acima de 8,3, o ácido carbônico se extingue e íons bicarbonato dissociam-se em carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (RICHTER, 2009). Em águas com concentrações elevadas de cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), os íons carbonato e bicarbonato reagirão com o cálcio dissolvido formando o  $\text{CaCO}_3$ , um precipitado de baixa solubilidade que forma incrustação com potencial de obstrução de emissores, válvulas, tubulações e outros dispositivos utilizados em sistemas de irrigação (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979; HILLS; NAWAR; WALLER, 1989; NAKAYAMA, F S; BUCKS, 1991).

A precipitação do carbonato de cálcio ocorre em condição de saturação das espécies que compõe o sistema carbonato e do cálcio, e depende fortemente do pH da água, sendo a ocorrência da reação em pH alcalino (GABRIELLI et al., 2006; LIU et al., 2015; MARUSCAK; BAKER; BERGOUGNOU, 1971; TIJING et al., 2011). A temperatura da água também influencia na precipitação química do  $\text{CaCO}_3$ , uma vez que a solubilidade desse precipitado diminui com o aumento da temperatura (LI et al., 2013b; LIU et al., 2015; RIZK et al., 2017; SIMONIČ; URBANCL, 2017). Em sistemas de irrigação, o aquecimento das tubulações e, conseqüentemente, da água, devido à incidência de radiação solar reduz a solubilidade do  $\text{CO}_2$  provocando a liberação de gás carbônico para a atmosfera e aumento do pH da água, que tem como consequência a formação de precipitados de  $\text{CaCO}_3$  (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979; GHOBADI NIA et al., 2010).

Para determinar o risco de precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , pode-se recorrer a índices que foram propostos com base no conceito da saturação do  $\text{CaCO}_3$ . Os índices mais comuns para a avaliação do risco de precipitação do  $\text{CaCO}_3$  são o Índice de Saturação de Langelier (ISL) e o Índice de Saturação de Ryznar (ISR), sendo o primeiro o mais utilizado (GHOBADI NIA et al., 2010; RICHTER, 2009). Há, ainda, aplicativos computacionais, como o PHREEQC, que podem ser utilizados para estimar a formação de precipitados, sendo úteis para a definição de limites de qualidade de água aceitáveis para uso em irrigação (REIS et al., 2018; RIZK et al., 2017; SINGH et al., 2017).

A precipitação do  $\text{CaCO}_3$  também é influenciada pelo material e pela rugosidade da superfície de escoamento, havendo interferência em processos de nucleação, adesão e de formação dos cristais (KUKULKA, 2005; SIGNORELLI; SOUSA; BERTRAN, 2019). Quanto maior a rugosidade, maior a tendência de formação de incrustações e maior a força com que incrustações de  $\text{CaCO}_3$  se aderem à superfície, tornando-se mais difícil desprender precipitados nessas situações (ALAHMAD, 2008; KEYSAR et al., 1994). Nesse aspecto, a fabricação de tubos e emissores de superfície mais lisa caracteriza uma vantagem construtiva.

A recuperação de emissores obstruídos pode ser realizada com a aplicação de ácidos fortes. Contudo, alguns pesquisadores relatam que o tratamento químico para recuperação de emissores é dispendioso e nem sempre eficaz, pois grandes quantidades de produtos químicos são requeridas e esses produtos normalmente são caros e perigosos para o operador, além de poderem danificar outros componentes do sistema de irrigação (ALBAJI et al., 2010; SOUZA et al., 2006; SILVA; CARVALHO, 2004; TEIXEIRA et al., 2010). Deve-se ressaltar que a injeção de produtos químicos atinge todos os emissores e não necessariamente aqueles com entupimento, onde sua ação deveria ocorrer (DUARTE, 2010).

Como alternativa aos produtos químicos, algumas pesquisas focaram no uso de microrganismos como agentes de desobstrução de emissores. Por exemplo, Eroglu et al. (2012) avaliaram a aplicação de duas cepas bacterianas (*Bacillus subtilis* OSU-142 e *Lactococcus garvieae*) para remoção de precipitados de  $\text{CaCO}_3$  em emissores obstruídos. Os resultados mostraram que a vazão dos emissores entupidos aumentou em 10 e 20% nas linhas de gotejamento que foram tratadas com *Lactococcus garvieae* e *Bacillus subtilis* OSU-142, respectivamente. No tratamento controle, houve diminuição de 5% da vazão. Não houve diferença na vazão após 4 e 24 h de exposição. O aumento da vazão devido a aplicação das cepas bacterianas foi atribuído à desestabilização física e química dos precipitados nos emissores. A desestabilização física ocorreu devido à erosão dos precipitados causada pela aderência de bactérias enquanto a suspensão gotejava dos emissores. Já a desestabilização química ocorreu devido à corrosão bacteriana dos precipitados diretamente do interior dos emissores. Além disso, foi comprovado que *Bacillus subtilis* OSU-142 pode reduzir o possível material biológico acumulado que acompanha precipitados químicos (ŞAHIN et al., 2005) e *Lactococcus garvieae* pode produzir micro-ambientes ácidos dissolvendo o  $\text{CaCO}_3$  próximo às bactérias (EROGLU et al., 2012). Vale ressaltar que a escolha das bactérias que serão utilizadas para a recuperação de emissores de gotejamento entupidos é importante, pois metabólitos e biofilmes bacterianos podem causar entupimento biológico (FORD; TUCKER, 1975; YAN et al., 2009).

Medidas preventivas de obstrução química podem ser praticadas e são recomendadas para o sucesso da operação do sistema de irrigação por gotejamento com águas duras (NAKAYAMA, F S; BUCKS, 1991). Como regra prática, recomenda-se que os ácidos sejam aplicados em quantidades suficientes para manter o pH da água próximo, porém não inferior a 6,5. Os ácidos mais utilizados são o nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), o fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), o clorídrico ( $\text{HCl}$ ) e o sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). O ácido fosfórico é o preferido em função da maior segurança no manuseio e por ser mais fraco que os demais. Entretanto, águas que requerem mais de  $1,5 \text{ mmol L}^{-1}$  do ácido fosfórico para neutralizar a alcalinidade podem aumentar demasiadamente o teor de fósforo no solo, tornando-o tóxico para as culturas (DUARTE, 2010).

O entupimento de emissores causado pela precipitação química do  $\text{CaCO}_3$  tem sido investigado em alguns estudos (RIZK et al., 2017; ZHANGZHONG et al., 2018, 2019), entretanto, investigações acerca do mecanismo de formação e das características do precipitado químico se concentraram principalmente em estudos na área de sistemas industriais de tratamento de águas duras e em sistemas de extração de petróleo (COSMO et al., 2019; GOPI; SUBRAMANIAN, 2012; LILI et al., 2016; NAM et al., 2016; REIS et al., 2017; ZHENG; QIAN, 2020). O entendimento de mecanismos de formação de depósitos em labirintos de emissores é escasso na literatura. Os estudos existentes concentram-se em avaliar causa-efeito, o que limita o entendimento do processo de incrustação.

Pitts et al. (1990) avaliaram um sistema de irrigação por gotejamento operando em campo com água de diferentes fontes e diferentes valores de dureza ( $150$  e  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ ). Os autores observaram que não houve obstrução quando a dureza da água era menor que  $150 \text{ mg L}^{-1}$ . Por outro lado, foi observado entupimento severo dos emissores quando o sistema foi operado com água com dureza de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  (PITTS; HAMAN; SMAJSTRIA, 1990). Lili et al. (2016) avaliaram um sistema de irrigação em campo operando com água de alta salinidade. Os autores observaram que a obstrução dos emissores ocorreu principalmente devido a precipitados químicos, sendo os precipitados constituídos em sua maior parte por  $\text{CaCO}_3$ . As quantidades de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$  mostraram uma forte correlação positiva com a vazão relativa ( $Q_r$ ) dos emissores e com o coeficiente de uniformidade (CU) ( $R^2 = 0,93$  e  $0,92$ , respectivamente), enquanto que as quantidades de quartzo mostraram uma relação linear negativa com a  $Q_r$  e com o CU ( $R^2 = 0,85$  e  $0,87$ , respectivamente). O principal material responsável pela obstrução dos emissores foram os precipitados de  $\text{CaCO}_3$ , responsáveis por mais de  $88,1\%$  do material encontrado nos labirintos (LILI et al., 2016).

Zhou et al. (2018) avaliaram um sistema de irrigação operando com águas subterrâneas e água residuária tratada (ART) com diferentes concentrações de íons  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ .

Os resultados indicaram que as características de entupimento do emissor coincidiram em diferentes tratamentos ao utilizar ART, e precipitados químicos foram encontrados em todos os tratamentos. Concentrações mais altas de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  levaram a um entupimento mais severo do emissor. As variações na Qr e no coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) para os tratamentos com ART foram inferiores às variações observadas no tratamento com águas subterrâneas. As quantidades de minerais encontrados nos labirintos dos emissores mostraram correlações lineares significativas com o grau de obstrução do emissor, o que indicou que os componentes minerais aumentaram à medida que o sistema continuou a operar. O conteúdo de carbonato aumentou em um padrão exponencial com o conteúdo de quartzo, o que demonstrou que o carbonato foi o principal componente mineral formado durante o processo de obstrução e o principal componente que contribuiu para o aumento do grau de obstrução (ZHOU et al., 2018).

## **2.6 Obstrução de emissores por interação entre agentes de natureza física e precipitados de carbonato de cálcio**

A obstrução de emissores em campo, de fato, não é esperada devido à ação de agentes físicos, químicos ou biológicos atuando isoladamente (LI et al., 2019b). Durante operações práticas no campo, a obstrução de emissores frequentemente é relatada como consequência do acúmulo de partículas sólidas, precipitados químicos e desenvolvimento de biofilme, agindo em concomitância; assim, supõem-se que as substâncias que causam a obstrução são induzidas pelos efeitos combinados das características físicas, químicas e biológicas da qualidade da água (CAPRA; SCICOLONE, 2007; LILI et al., 2016; LIU; HUANG, 2009; PEI et al., 2014; PUIG-BARGUÉS et al., 2010; RAVINA et al., 1992). Entender os mecanismos de obstrução devido à interação de agentes de diferentes naturezas nem sempre é uma tarefa fácil, uma vez que estes podem interagir, tornando-se mais difícil separar os efeitos de cada agente. Estudos objetivando entender os mecanismos de diferentes agentes na água, interagindo entre si, e seus efeitos na obstrução de emissores são escassos na literatura.

A precipitação do  $\text{CaCO}_3$  pode ser influenciada pela presença de outras substâncias presentes na água. O efeito de inibidores e de substâncias estranhas na taxa de nucleação, no crescimento e na morfologia do  $\text{CaCO}_3$  é discutido em alguns estudos na área de cristalização. Aparentemente, já se sabe que muitas substâncias agem inibindo o crescimento desse sal e provocando alterações no seu hábito cristalino. A morfologia e a pureza de cristais são influenciadas pela presença de impurezas que alteram os parâmetros cinéticos da cristalização.

Além disso, as taxas de nucleação primária heterogênea e secundária podem também ser aumentadas ou diminuídas pela presença de impurezas (COSTA; GIULIETTI, 2010).

São chamadas de impurezas ou substâncias estranhas tudo o que há na solução, diferente do soluto e do solvente. Tais impurezas interferem na morfologia cristalina durante o processo de formação do cristal. A morfologia ou hábito cristalino refere-se a sua aparência externa, e é influenciada pelo arranjo regular das moléculas em um retículo cristalino que lhes dão formas regulares como poliedros (COSTA; GIULIETTI, 2010; GOPI; SUBRAMANIAN, 2012). A morfologia cristalina é influenciada por dois fatores: a simetria da estrutura cristalina interna e as taxas de crescimentos das faces que limitam o cristal. Quanto menor o crescimento em determinada direção, menos a face se desenvolve na direção perpendicular a ela, de modo que a forma do cristal é determinada pela face com crescimento mais lento. Os principais fatores externos que afetam a morfologia são: nível de saturação, temperatura, solvente utilizado e a pureza das soluções. Mesmo em concentrações muito baixas (na ordem de ppm) as impurezas já são capazes de provocar grande efeito na morfologia do cristal (ALSADAIE; MUJTABA, 2019; ANDRITSOS; KARABELAS, 1999; ANDRITSOS; KARABELAS; KOUTSOUKOS, 1997; COSTA; GIULIETTI, 2010). As impurezas podem, ainda, afetar fortemente o crescimento do cristal através de adsorção em uma superfície bloqueando sítios de crescimento. A capacidade da impureza de se incorporar na estrutura cristalina depende do seu tamanho, estereoquímica e funcionalidade (KUBOTA; MULLIN, 1995).

Karoui et al. (2010) reportaram o efeito de argilas montmorilonita e caulinita na nucleação e crescimento de carbonato de cálcio em água do mar. Foi demonstrado por análise de difração de raios-x e microscopia eletrônica de varredura que o  $\text{CaCO}_3$  cristalizou na forma de aragonita, tanto nos testes variando a concentração de argila, quanto nos testes variando o tipo de argila. Verificou-se também que as argilas testadas inibiram significativamente a cristalização do carbonato de cálcio, principalmente para concentrações de argila superiores a  $25 \text{ mg L}^{-1}$ . Isso sugere que as argilas testadas têm efeito indireto na nucleação e crescimento da aragonita, através do aumento da concentração de íons magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) na água, forte inibidor da formação de  $\text{CaCO}_3$ . Os autores ainda concluíram que a caulinita pode interagir com a aragonita adsorvendo em suas faces e bloqueando os locais de crescimento.

Em outro estudo com partículas de argila e  $\text{CaCO}_3$  em água marítima envolvendo cronoamperometria, foi relatado que a montmorilonita retardou significativamente o início da precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , entretanto, uma vez que a precipitação começa, a cinética de deposição permaneceu inalterada em relação à situação sem partículas de argila (DESLOUIS et al., 2006). Além disso, o tempo de duração do período de atraso é, aproximadamente, proporcional à

concentração de argila na solução. Foi verificado também pelos autores que a proporção relativa de quantidades de  $Mg^{+2}$  em relação ao  $Ca^{+2}$  nos depósitos calcários aumentou com o aumento da concentração de sedimentos na solução. Isso foi explicado pelas propriedades de troca catiônica da montmorilonita, ou seja, os altos valores de pH interfacial prevalecentes no eletrodo, devido à reação de redução de oxigênio promovido no processo de cronoamperometria, induziram cargas negativas nas faces da argila, seguidas por um aumento de  $Ca^{+2}$  e  $Mg^{+2}$  na camada dupla difusa ao redor das plaquetas de argila. Os autores ainda supuseram que a deposição de  $CaCO_3$  ocorreu diretamente sobre as partículas de argila.

Entender os mecanismos de interação de partículas com precipitados de  $CaCO_3$  ajudaria no planejamento das rotinas de manutenção e escolha do tipo de emissor e de outros componentes do sistema de irrigação, considerando que a qualidade da água é um fator decisivo e relevante na escolha. Tipicamente, em sistemas de irrigação que operam com águas de baixa qualidade, principalmente águas superficiais, é muito comum a presença de argilas na água. As argilas não são retidas nos sistemas de filtragem comumente empregados em irrigação, pois apresentam granulometria inferior a 0,002 mm (SANTOS et al., 2015), e as malhas de filtragem disponíveis comercialmente apresentam abertura, normalmente, muito superiores (>0,070 mm). Qualquer que seja a fração granulométrica ou o tipo de argila presente na água, é importante se atentar para outros parâmetros de qualidade da água, uma vez que a interação entre eles poderá provocar efeitos combinados e resultar em consequências inesperadas e gastos dispendiosos com o sistema de irrigação, como é o caso da obstrução de emissores.

## **2.7 Nucleação e crescimento de cristais**

A incrustação inorgânica, ou incrustação salina, é a aderência, a uma superfície, de um mineral que se forma devido à saturação do ambiente local com um sal inorgânico. Em solução, esses sais encontram-se dissociados na forma de íons dissolvidos. Entretanto, se a concentração do sal for superior à sua solubilidade naquele ambiente, irá precipitar como um sólido, formado por íons que se encontravam dissolvidos e que foram unidos por uma ligação iônica (COSMO et al., 2019). Entre os minerais, o  $CaCO_3$  é um dos mais comuns, e trata-se do depósito carbonático de maior ocorrência devido a fatores como baixa solubilidade, alta disponibilidade de cálcio no meio e condições termoquímicas favoráveis à sua formação. Pode ser originário tanto de formações carbonáticas quanto de formações areníticas e, em ambas, a salmoura, que ocupa o espaço poroso, juntamente com os hidrocarbonetos, são os principais responsáveis por manter dissociados o cálcio e o carbonato (COSMO, 2013; STUMM; MORGAN, 1996).

O  $\text{CaCO}_3$  pode ocorrer tanto nas fases anidras quanto nas fases hidratadas. Nas fases anidras pode ocorrer na forma de três polimorfos, que se diferenciam pelo arranjo cristalino e morfologia: calcita, aragonita e vaterita. Já na forma hidratada, tem-se o carbonato de cálcio amorfo, o mono-hidratado e o hexa-hidratado. A calcita é a forma mais comum encontrada e se apresenta como o maior entrave ao escoamento. Mudanças na temperatura, pH, força iônica e/ou concentração dos íons cálcio e carbonato afetam a supersaturação da solução, que é o fator mais importante para a formação do  $\text{CaCO}_3$  e a transformação dos polimorfos (COSMO, 2013; KOUTSOUKOS; CHEN, 2010; SPANOS; KOUTSOUKOS, 1998).

No processo de cristalização, os fenômenos responsáveis pela retirada do soluto da solução e sua incorporação em uma fase sólida são chamados de nucleação e crescimento. A nucleação consiste na formação de novos cristais, enquanto o crescimento é o processo pelo qual os cristais já existentes se tornam maiores. Diversos fatores afetam a formação e o crescimento de cristais, incluindo a hidrodinâmica do sistema, a temperatura e a presença de impurezas suspensas ou dissolvidas, sendo que todos esses fatores consomem massa de soluto. Além desses fatores, a aglomeração e a quebra de cristais alteram a distribuição de partículas nos diversos tamanhos (COSTA; GIULIETTI, 2010; GOPI; SUBRAMANIAN, 2012; YANG et al., 2001).

Compreende-se por nucleação, a formação de corpos cristalinos a partir de uma solução supersaturada. Na região de supersaturação existe um equilíbrio dinâmico de formação e desintegração de agregados quase líquidos do soluto (os chamados *clusters* – que nada mais são do que algumas dezenas de moléculas unidas por forças intermoleculares relativamente fracas e organizadas de modo regular). A formação dos *cluster* é favorecida por uma elevação no grau de supersaturação e, a passagem dos agregados maiores à forma de núcleos se dá tanto pelo arranjo de seus constituintes na forma de uma estrutura cristalina como por uma interface sólido-líquido, sendo acompanhada por uma variação de energia livre global do sistema (energia livre de Gibbs,  $\Delta G$ ). Essa variação de energia apresenta um ponto de máximo, que corresponde a um tamanho crítico do cristal (núcleo crítico) e representa a barreira energética a ser vencida para que a nucleação ocorra (COSTA; GIULIETTI, 2010).

A nucleação pode ser dividida em nucleação primária, quando ocorre em uma solução totalmente isenta de cristais do soluto; e nucleação secundária, quando já existe cristais do soluto em solução. A nucleação primária está associada com altos níveis de supersaturação e pode ainda ser classificada em nucleação primária homogênea e nucleação primária heterogênea.

Na nucleação primária homogênea, a formação de novas partículas não é influenciada por nenhum tipo de sólido e nem pelas paredes da superfície ou por partículas submicroscópicas de substâncias estranhas, e a colisão das partículas de soluto que formam novos *clusters* são responsáveis pela formação de uma nova fase. Para que haja nucleação primária homogênea é requerida alta supersaturação para superar a tensão interfacial entre os *clusters* e a solução, e os núcleos se formam de maneira homogênea ao longo de toda a fase (PÄÄKKÖNEN et al., 2012; SAWADA, 1997).

Na nucleação primária heterogênea, uma substância estranha constituída de partículas finas está presente na solução na qual ocorre a cristalização, catalisando um aumento da taxa de nucleação. Uma superfície permite a adsorção de material cristalizante e diminui a variação da energia livre de Gibbs do processo de cristalização. Em soluções onde há substâncias estranhas, a nucleação primária é essencialmente heterogênea. A nucleação heterogênea ocorre em níveis de supersaturação significativamente menores do que os requeridos para a homogênea. O mecanismo da nucleação primária heterogênea ainda não é totalmente compreendido, mas se dá por adsorção do soluto nas superfícies das partículas sólidas. Essas partículas estáveis então crescem em macrocristais (COSTA; GIULIETTI, 2010).

A nucleação secundária ocorre somente quando cristais do soluto já estão presentes, sendo que eles podem ser adicionados (sementes) ou formados na própria solução. A nucleação secundária de contato é um dos principais fatores responsáveis pelo surgimento de novos cristais. O contato, nesse caso, pode ser dos cristais existentes entre si, entre os cristais existentes e as paredes do sistema e, ao contrário da nucleação primária, que requer supersaturações relativamente altas, a nucleação secundária já ocorre em valores de supersaturação baixos a moderados (COSTA; GIULIETTI, 2010; DIRKSEN; RING, 1991).

A taxa de nucleação é definida como o número de núcleos formados por unidade de volume e por unidade de tempo. Algumas medidas práticas podem indicar a ocorrência da nucleação em um dado sistema. Como há liberação de energia na ocorrência da nucleação (calor de cristalização), a temperatura aumenta levemente, outras medidas incluem: condutividade, densidade ou índice de refração. Pode-se usar alguma dessas medidas para medir o tempo de indução ( $t_i$ ), definido como o tempo decorrido entre o surgimento da supersaturação e a ocorrência da nucleação, e que é inversamente proporcional à taxa de nucleação primária (DIRKSEN; RING, 1991; LIOLIOU et al., 2007).

O crescimento de cristais pode ser descrito em duas etapas: 1) transferência de massa, por difusão ou convecção, do soluto do seio da solução para a superfície do cristal, seguida por 2) incorporação na superfície, na qual as unidades de crescimento são integradas à

rede cristalina. Além da solubilidade, também o tamanho do cristal e o nível de supersaturação têm efeito sobre qual dos dois passos de crescimento é dominante. Para cristais muito pequenos e valores muito baixos de supersaturação, a integração superficial é sempre a etapa dominante para o processo de crescimento. Para a maioria dos compostos, entretanto, ambas as etapas devem ser levadas em conta para o cálculo da taxa de crescimento (COSTA; GIULIETTI, 2010; KUBOTA; MULLIN, 1995; LIOLIOU et al., 2007).

A topologia do cristal influencia na maneira como se dá a etapa de integração de novas unidades à superfície cristalina. A etapa de reação de superfície envolve processos individuais que podem ser diversos e complexos e, portanto, difíceis de entender. Uma possível inibição da reação de integração à superfície é a adsorção de partículas estranhas ou impurezas na superfície do cristal. As partículas devem então ser desorvidas ou o crescimento deve ocorrer por cima delas, processos que, às vezes, ocorrem somente a uma alta supersaturação da substância a ser cristalizada (COSTA; GIULIETTI, 2010).

## **2.8 Características geométricas de labirintos e obstrução de emissores**

No projeto de gotejadores, busca-se agrupar características que assegurem desempenho hidráulico e resistência à obstrução. O desempenho hidráulico satisfatório geralmente é obtido pelo projeto de emissores que operam em fluxo turbulento. Em tais condições hidrodinâmicas, a vazão praticamente não é influenciada por efeitos de temperatura (CLARK; LAMM; ROGERS, 2005; DOGAN; KIRNAK, 2009; SINOBAS; JUANA; LOSADA, 1999) e não é tão sensível a variações de pressão, como seriam os emissores de fluxo laminar (FRIZZONE et al., 2012). No entanto, é necessário também que o emissor mantenha suas características operacionais originais quando submetido a operação em condições de risco de obstrução, sendo esse aspecto tratado como resistência ou sensibilidade à obstrução. Informações sobre o comportamento das partículas no interior do labirinto contribuem para a compreensão dos processos de obstrução e permitem identificar características construtivas que tornam os emissores menos suscetíveis a esse problema. É mencionado na literatura que melhorias na geometria de gotejadores envolvam otimização do formato do labirinto para aumentar a capacidade de transporte de partículas e/ou aumento da habilidade de auto-limpeza dos labirintos (FENG et al., 2018).

Melhorar a capacidade de resistência à obstrução dos emissores é a maneira mais direta e eficaz para diminuir os problemas de obstrução (ZHOU et al., 2019a). Duas principais abordagens são levadas em consideração ao se projetar emissores a fim de evitar o acúmulo de partículas no labirinto: a primeira consiste em otimizar a região de fluxo principal do canal, a

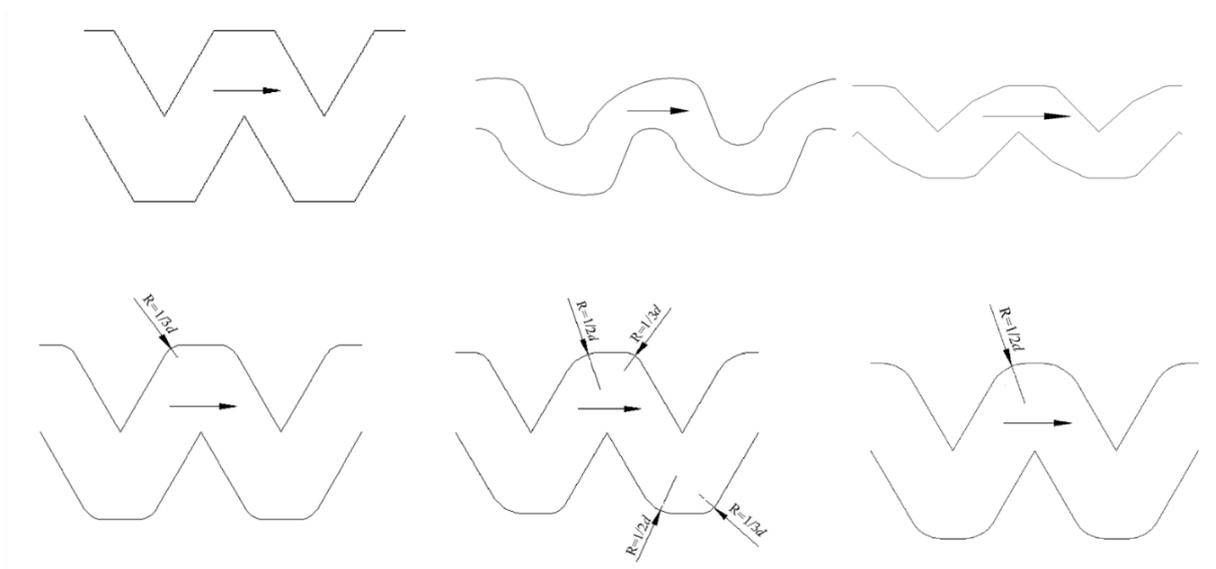
segunda consiste em aprimorar as regiões de vórtices favorecendo a lavagem da parede do canal durante o escoamento. A primeira estratégia de projeto consiste em eliminar regiões de estagnação do fluxo, nas quais a velocidade de escoamento é baixa ou nula e onde os sedimentos se depositam facilmente. Além disso, busca-se a formação de uma região de fluxo principal com capacidade para favorecer o transporte de partículas pelo canal do emissor, para que eles saiam rapidamente evitando o entupimento. A segunda estratégia consiste em projetar geometrias de labirinto na qual haverá formação de vórtices bem desenvolvidos durante o escoamento, utilizando a própria água para limpeza das paredes, sendo que isso promove arraste de sedimentos e limpeza contínua do labirinto (FENG et al., 2018). A otimização da geometria de labirintos de modo que permita a lavagem das paredes durante o escoamento da água no interior do canal utilizando vórtices aprimorou com êxito a capacidade de auto-limpeza dos emissores (ZHOU et al., 2019a).

Yang et al. (2020) analisaram as distribuições de velocidade de escoamento, a energia cinética turbulenta e as trajetórias físicas de partículas dentro de emissores com diferentes configurações geométricas utilizando CFD e testes em laboratório. Os resultados mostraram que a energia cinética turbulenta máxima no canal ocorreu na área de fluxo principal e que a área de maior dissipação de energia cinética estava na ponta do dente. A área de fluxo principal foi maior para o emissor com canal triangular e a energia de turbulência na região de baixa velocidade foi mais alta para os emissores de formato trapezoidal-circular. Os resultados sugeriram um esquema para otimização dos defletores do emissor. Para a estrutura de canal otimizada, o valor máximo da energia cinética turbulenta aumentou em cerca de 19-101% em comparação com os outros canais não otimizados. A área da região de fluxo principal e a energia cinética turbulenta na área de baixa velocidade no emissor foram aumentadas. A energia cinética turbulenta aumentou em 52–200% na região de baixa velocidade do canal. A taxa de transporte de partículas físicas foi aumentada e o tempo de permanência das partículas no canal foram reduzidos. Os resultados experimentais mostraram que o emissor cujo canal foi otimizado diminuiu a probabilidade de obstrução em comparação com as outras geometrias não otimizadas. Portanto, aumentar a área da região de fluxo principal e a energia cinética turbulenta na área de baixa velocidade do canal é uma maneira efetiva de melhorar o desempenho do emissor em relação à obstrução (YANG et al., 2020).

Li et al. (2019b) avaliaram oito emissores planos, comumente utilizados em gotejamento, a fim de analisar os efeitos dos parâmetros geométricos do labirinto no desempenho hidráulico, na resistência à obstrução e na composição das substâncias que obstruíram o emissor. Os resultados indicaram que a velocidade média de escoamento na seção

transversal foi significativamente correlacionada com o grau de obstrução do emissor e com as substâncias que o obstruiu. A velocidade foi afetada diretamente pelas substâncias que causaram a obstrução, pela relação entre a largura ( $W$ ) e a profundidade ( $D$ ) ( $W/D$ ) do canal, e pela relação raiz quadrada da área ( $A$ ) pelo comprimento ( $L$ ) ( $A^{1/2}/L$ ). Entre os componentes que obstruíram os gotejadores, as partículas sólidas e os precipitados de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$  foram correlacionados diretamente com o grau de obstrução, enquanto que os ácidos graxos de fosfolípidios e as substâncias poliméricas extracelular foram correlacionados indiretamente. Portanto, de acordo com os autores, na escolha de emissores mais resistentes à obstrução, deve-se levar em consideração a velocidade de escoamento na seção transversal, e não a vazão do emissor, isso significa que, um emissor que apresentar maior vazão, não necessariamente será o mais resistente ao entupimento. Ainda de acordo com os autores, maior velocidade de escoamento pode ser obtida por meio da otimização da geometria do labirinto utilizando as relações de  $W/D$  e  $A^{1/2}/L$  (LI et al., 2019b).

Feng et al. (2018) esclarecem que, ao eliminar as zonas de vórtice do labirinto pode-se diminuir significativamente o desempenho hidráulico do emissor e aumentar o custo de fabricação do mesmo, aumentando assim, os custos com o sistema de irrigação por gotejamento. Os autores sugerem que o labirinto deve ser aprimorado a fim de aumentar a velocidade de escoamento perto da parede e a intensidade da turbulência na área onde o sedimento se deposita mais facilmente. A capacidade de autolimpeza do emissor foi aprimorada pelos autores utilizando ciclos de vórtice, e os desempenhos hidráulico e anti-obstrução também foram aprimorados conforme é mostrado na Figura 2.



**Figura 2.** Protótipos de labirinto e diferentes tratamentos para otimização de geometria. A seta indica a direção do fluxo de água. Fonte: adaptado de (FENG et al., 2018).

## 2.9 Fluidodinâmica computacional

A fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD) é uma ferramenta de simulação que utiliza modelos matemáticos para simular o perfil de escoamento de fluidos, transferência de calor e massa em um volume de controle, reações químicas, além de outros fenômenos. CFD tem sido muito utilizado devido à possibilidade de geração de modelos matemáticos capazes de prever fenômenos físicos e químicos que acontecem durante o processo, permitindo assim, economia de tempo e recursos para obtenção de dados sobre o processo, que, normalmente, seriam obtidos por meio de ensaios experimentais (CHHANWAL et al., 2011; KURIAKOSE; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2010). Além disso, CFD tem a vantagem de ser capaz de isolar os fenômenos para que possam ser compreendidos individualmente antes de se estudar o processo como um todo, e obter resultados que dificilmente seriam obtidos por meio de experimentos (WALKER; SHEIKHOLESLAMI, 2003).

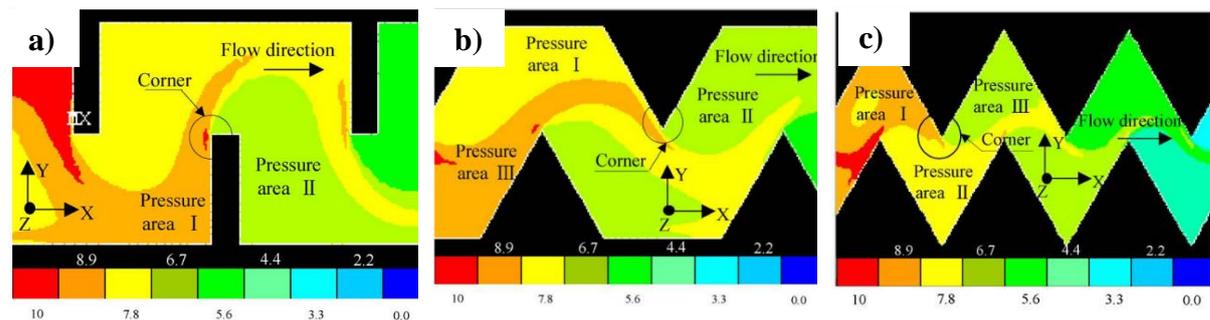
O uso de aplicativos para simulações de fluidodinâmica computacional aplicada ao estudo de gotejadores vem sendo explorado em pesquisas recentes (AIT-MOUHEB et al., 2019; BOUNOUA et al., 2016; CAMARGO et al., 2020; FENG et al., 2018; LI et al., 2008, 2009; PATIL; NIMBALKAR; JOSHI, 2013; QINGSONG et al., 2008; WEI et al., 2006; WU et al., 2013; ZHANG et al., 2007, 2010). Simulações numéricas envolvendo escoamento monofásico em distintas geometrias de emissores, aparentemente, já são satisfatórias. Todavia, são incipientes as simulações de escoamento bifásico (água e partículas) visando estimar a dinâmica de vazão ou o acúmulo de sedimentos em função de tempos de operação de gotejadores.

A fluidodinâmica computacional possui vantagens exclusivas para analisar o fluxo de fluidos. É possível combinar simulação numérica com pesquisa experimental e teórica, visando a compreensão do movimento do fluido. Isso pode auxiliar os projetistas a tomarem decisão de maneira rápida e econômica, ajudando na otimização dos diferentes parâmetros no projeto de emissores, o que reduz significativamente a necessidade de trabalho físico experimental.

CFD tem sido utilizado em estudos das propriedades do movimento do fluxo no labirinto de emissores utilizados em sistemas de irrigação por gotejamento em algumas pesquisas. Palau et al. (2004) estudaram, por meio de simulações e experimentação, a relação entre a variação de pressão de operação e a vazão emitida, para um dado modelo de labirinto, utilizando CFD. Os resultados obtidos na simulação computacional mostraram uma boa concordância com resultados obtidos em laboratório, indicando que CFD pode ser útil para o

projeto de novos emissores (PALAU SALVADOR; ARVIZA VALVERDE; BRALTS, 2004). CFD foi utilizado para analisar o movimento do fluido em caminhos de fluxo de labirinto de gotejador juntamente com um sistema de exibição visual de velocimetria de imagem de partícula digital bidimensional, a fim de validar as simulações numéricas (LI et al., 2008). Em termos de resistência ao entupimento, os autores recomendaram que no projeto do gotejador devem ser eliminadas as regiões de baixa velocidade criando conexões de arco suaves nessas regiões. Eles também mencionaram que o raio de arco ideal irá variar de acordo com a pressão de operação. Além disso, a intensidade da turbulência é referida como uma variável de fluxo interessante que descreve as propriedades de dissipação de energia dos emissores e interfere na capacidade de transporte de sedimentos dentro dos canais (LI et al., 2008).

Weï et al. (2006) utilizaram CFD para simular as distribuições de pressão e de velocidade do escoamento, e para calcular a relação entre pressão e vazão para canais de labirintos com três formatos diferentes: triangular, retangular e trapezoidal. Os resultados da simulação dos perfis de pressão ao longo dos canais são representados na Figura 3.

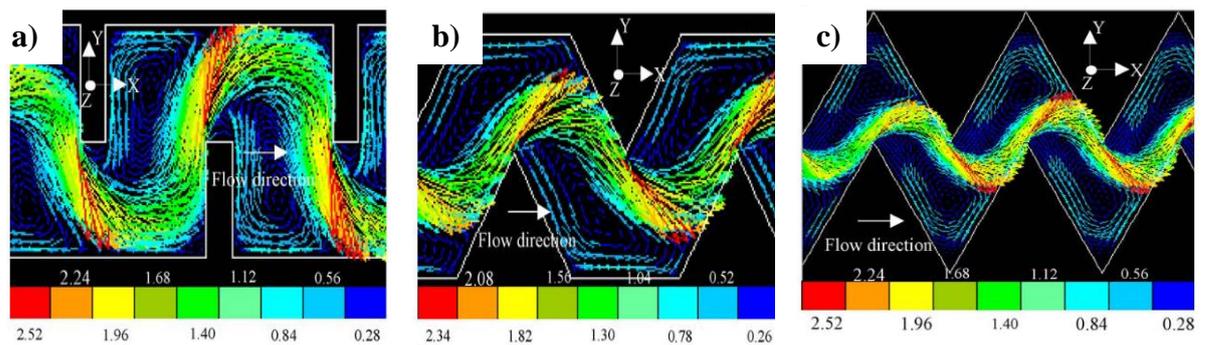


**Figura 3.** Distribuições de carga de pressão (m) ao longo do escoamento em canais retangulares (a), trapezoidais (b) e triangulares (c). Fonte: (WEI et al., 2006).

De acordo com os autores, existe um gradiente de pressão em cada um dos três canais do labirinto. Em cada tipo de canal, as mudanças nos gradientes de pressão ocorrem principalmente nos cantos dos canais. Quando o fluxo chega no canto, a mudança na direção do fluxo resulta em uma grande perda de pressão local, que é a principal causa da dissipação de energia hidráulica. Portanto, a perda de pressão no canto do canal determinará o grau de dissipação de energia hidráulica. Os resultados das distribuições de pressão nos três canais também mostram que: 1) há duas áreas de pressão (I e II) ao redor do canto do canal retangular (Figura 3a); 2) ao lado dessas duas áreas, há uma terceira área (III) ao redor do canto do canal trapezoidal (Figura 3b); e, 3) existem três áreas de pressão igual (I – III) no canal triangular (Figura 3c). Quanto mais a pressão varia, maior será a perda de pressão. Além disso, os resultados de CFD permitiram aos autores concluir que há uma maior dissipação de pressão,

por unidade de comprimento de canal, no canal triangular do que nos canais retangulares e trapezoidais.

Já os campos de distribuição da velocidade simulados por Wei et al. (2006) são mostrados na Figura 4. Os resultados das simulações permitiram aos autores concluir que as linhas de fluxo nos três canais seguem uma mesma tendência. Uma curva aparece no canto do canal, o que faz com que o fluxo se mova ao longo do caminho em forma de S. Além disso, alguns vórtices se formam nos canais. Esses vórtices são responsáveis por aumentar a dissipação de energia cinética, que irá afetar diretamente a eficiência da dissipação de energia hidráulica. Ainda de acordo com os autores, a velocidade do escoamento ao longo do canal é que determinará a vazão do emissor. Conseqüentemente, comparando as distribuições de velocidade ao longo do escoamento nos três canais, o canal retangular apresenta maior vazão por unidade de pressão.



**Figura 4.** Distribuições dos perfis de velocidade ( $\text{m s}^{-1}$ ) ao longo do escoamento em canais retangulares (a), trapezoidais (b) e triangulares (c). Fonte: (WEI et al., 2006).

As aplicações descritas indicam que a modelagem com CFD é um método que pode ser preciso, rápido, prático e econômico para investigar tendências de desempenho hidráulico e anti-obstrução de gotejadores, indicando que sua aplicabilidade é útil para o projeto de novos emissores. Embora os dados experimentais sejam sempre essenciais para fins de validação, CFD poderá reduzir os ensaios laboratoriais e, conseqüentemente, os custos inerentes ao processo.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI/UNICAMP), com apoio do Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação (LEMI/INCT-EI/ESALQ/USP) e do French National Research Institute for Agriculture, Food and the Environment (INRAe, Montpellier), sob condições controladas e monitoradas.

#### 3.1 Protótipos de gotejadores avaliados

Os emissores avaliados são protótipos que foram projetados e construídos por Lavanholi et al. (2020). Os protótipos de emissores apresentam características similares aos labirintos utilizados comercialmente, porém, são fabricados em material transparente que possibilita a filmagem e observação do processo de deposição e incrustação do  $\text{CaCO}_3$ , transporte e acúmulo de sedimentos no interior do labirinto. Além disso, os protótipos podem ser desmontados para a realização da limpeza do interior do canal, possibilitando a reutilização dos mesmos. Todos os protótipos de emissores avaliados são planos, não regulados, e apresentam seção de escoamento retangular ou quadrada e labirintos em formato trapezoidal.

Com o objetivo de facilitar a comparação entre emissores de diferentes geometrias, os emissores foram projetados para operar com vazão na faixa de 1,4 a 1,6  $\text{L h}^{-1}$  sob pressão de 100 kPa. A vazão de projeto foi determinada mediante estimativa do número de defletores ( $N$ ) de cada protótipo e, conseqüentemente, do comprimento do labirinto ( $L$ ).

Partindo da equação (3), que relaciona a queda total de pressão ( $\Delta P$ ) entre a entrada e a saída do labirinto (ZHANG et al., 2011), e considerando que  $\varphi$  é o coeficiente de perda de carga por defletor (Eq. 4), dependente do número de Reynolds, estrutura do canal, e da rugosidade da parede, pode-se concluir que valores maiores de  $\varphi$  indicam características de escoamento com maior perda de pressão, possibilitando a obtenção de emissores mais compactos e de menor comprimento (LAVANHOLI et al., 2020).

$$\Delta p = N \left( f \frac{l}{D_h} + \zeta \right) \frac{\rho Q^2}{2 A^2} \quad (3)$$

$$\varphi = \left( f \frac{l}{D_h} + \zeta \right) \quad (4)$$

Em que:  $\Delta p$  é a perda de pressão total no labirinto (Pa);  $N$  é o número de defletores;  $f$  é o fator de atrito da Equação de Darcy-Weisbach;  $l$  é o comprimento da seção reta de um defletor (m);  $D_h$  é o diâmetro hidráulico (m);  $\zeta$  é o coeficiente de perda localizada de carga em cada defletor;

$\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $Q$  é a vazão do canal ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $A$  é a área da seção de escoamento ( $\text{m}^2$ ); e,  $\varphi$  é o coeficiente de perda total de pressão por defletor.

Substituindo a equação (3) na equação (4) e reescrevendo-a, resulta a equação (5) (ZHANG et al., 2011; ZHANG; ZHAO; LU, 2013):

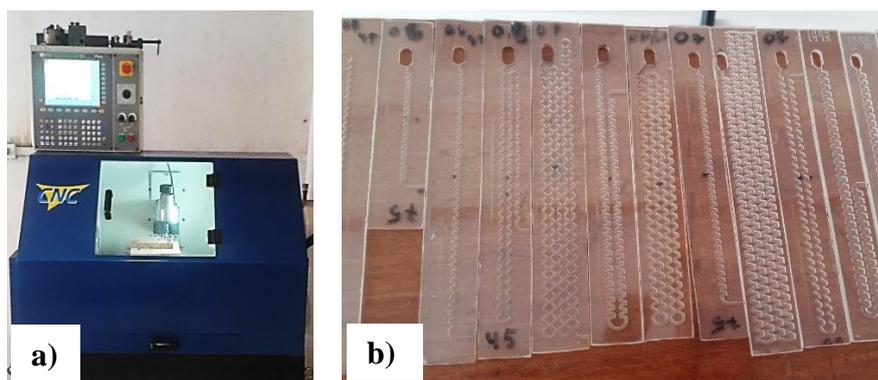
$$\varphi = \frac{2 A^2 \Delta p}{N \rho Q^2} \quad (5)$$

Rearranjando a equação (5), obtém-se a equação (6), a partir da qual foi possível estimar o número de defletores para um dado modelo de protótipo, e, conseqüentemente, o comprimento do seu labirinto, para dada vazão, pressão e seção de escoamento (LAVANHOLI et al., 2020).

$$N = \frac{2 A^2 \Delta p}{\varphi \rho Q^2} \quad (6)$$

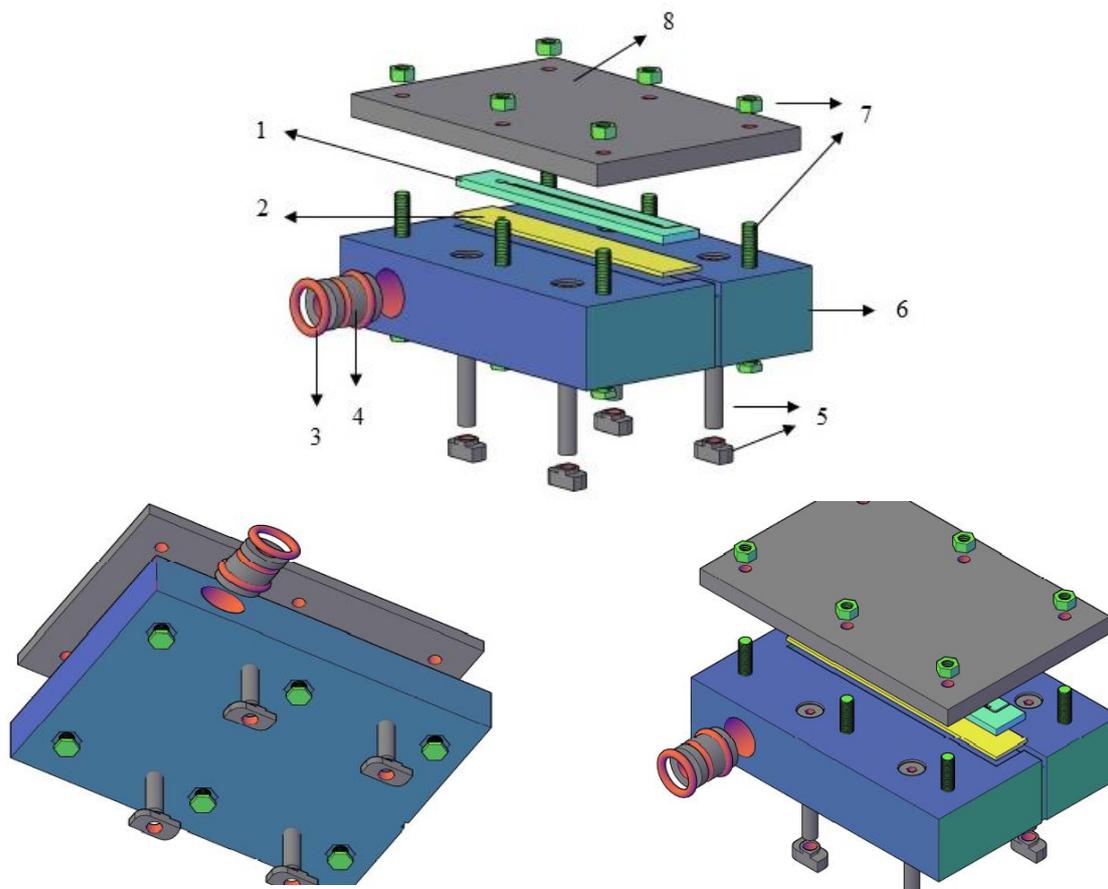
O número de defletores de cada protótipo de emissor necessários para a obtenção da vazão de projeto ( $1,4 - 1,6 \text{ L h}^{-1}$ ) foi obtido por simulações numéricas utilizando o modelo standard  $\kappa$ - $\varepsilon$  disponível no software de fluidodinâmica computacional COMSOL *Multiphysics*. Os labirintos foram desenhados utilizando software de desenho assistido por computador (CAD). A partir da simulação foi obtida a perda total de carga ao longo de 8 defletores e calculou-se a perda total de carga por defletor para cada geometria (Eq. 3). Utilizando a equação (4), foi estimado o número de defletores necessários para dissipar a pressão de 100 kPa e obter a vazão de projeto (LAVANHOLI et al., 2020).

Os protótipos foram fabricados utilizando fresagem com auxílio de uma máquina com Comando Numérico Computadorizado (CNC) (Figura 5a) 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. A fresagem é realizada em placas de polimetilmetacrilato (PMMA), conhecido também como acrílico, com espessura de 2 mm e comprimento e largura variando em função da geometria do labirinto (Figura 5b).



**Figura 5.** Fresadora CNC utilizada para fabricação dos canais dos labirintos (a); e, protótipos de labirintos de gotejadores (b). Fonte: (LAVANHOLI, 2019).

Para a condução do experimento com os protótipos, cada placa transparente contendo o labirinto foi acoplada a um suporte projetado para simular as condições na qual um emissor comercial opera em condições de campo, e que permite a aquisição contínua de imagens do labirinto sob avaliação (Figura 6). O suporte consistiu em uma placa de polipropileno (PP), devidamente usinada para o acoplamento da placa de acrílico e fixação na bancada de ensaio, simulando uma linha lateral. O suporte de PP foi projetado com uma cavidade central de 2 mm para acoplamento do protótipo do gotejador. A cavidade possui um canal com declividade de, aproximadamente, 2% no qual a água escoar em direção à saída, local de tomada de amostra para medição da vazão. Cada suporte possui parafusos para fixação na bancada e parafusos para fixação de uma placa de vidro translúcido, colocada sobre a placa de acrílico para vedar o canal e permitir o escoamento da água pelo labirinto. O vidro translúcido permite, ainda, a aquisição de imagens do interior do labirinto. O suporte de PP possui um canal de fluxo principal com diâmetro interno de 10 mm, e um orifício cujo diâmetro é de 3 mm, que permite a entrada de água no labirinto. A fim de evitar vazamentos, entre o suporte e a placa de acrílico foi colocada uma peça de silicone emborrachado com espessura de 2,0 mm e largura e comprimento iguais ao da placa contendo o labirinto. Entre a peça de silicone e a placa de acrílico foi colocada uma folha de papel alumínio para melhorar o contraste das imagens e facilitar a visualização do labirinto. Os suportes foram conectados uns aos outros por meio de um engate de latão vedado com anel O-Ring, simulando, assim, uma linha lateral.



**Figura 6.** Componentes do acessório para acoplamento dos protótipos de labirintos. (1) placa de acrílico com labirinto usinado; (2) borracha de silicone; (3) anel de vedação (o-ring); (4) engate de latão; (5) parafuso e porca para fixação do acessório na bancada de ensaio; (6) acessório de polipropileno; (7) parafuso e porca para fixação da placa de vidro; (8) placa de vidro.

Quinze modelos de labirintos de gotejadores foram estudados simultaneamente. Apenas uma peça de cada modelo de labirinto foi estudada, pois não houve interesse em mensurar a variabilidade do processo de fabricação. Os labirintos de gotejadores foram projetados seguindo duas estratégias de projeto. Na primeira, desejou-se projetar labirintos que favorecessem a formação de zonas de vórtice bem definidos e de diferentes magnitudes durante o escoamento da água no canal. Esses emissores foram denominados de emissores modelo A, sendo que foram estudados 9 modelos de labirintos dessa categoria. Na segunda estratégia, buscou-se projetar emissores com formação mínima de zonas de vórtice durante o escoamento. Esses protótipos apresentam labirintos que proporcionam escoamento uniforme em toda a seção do canal, havendo 6 geometrias de labirintos com essa característica. Tais emissores foram denominados de emissores modelo B.

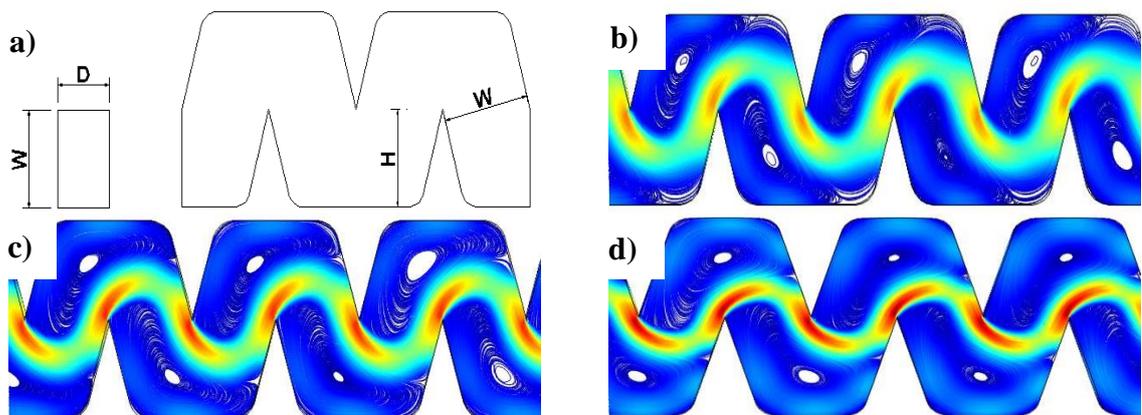
### 3.1.1 Emissores modelo A

Esse grupo é composto por 9 protótipos, cujas geometrias de labirinto foram projetadas para favorecer a formação de zonas de vórtice, a fim de permitir labirintos mais compactos e próximos da realidade observada em gotejadores comerciais. Buscou-se manter as vazões de projeto na faixa entre 1,4 a 1,6 L h<sup>-1</sup>. O ângulo do dente foi fixado em 75° e a profundidade do canal ( $D$ ) em 0,8 mm para todos os modelos. As combinações avaliadas apresentam diferentes relações entre altura do dente ( $H$ ) e largura do canal ( $W$ ). As características geométricas dos protótipos de labirintos com zonas de vórtice são apresentadas na Tabela 4. O aumento da altura do dente em relação a largura do canal permite a formação de vórtices maiores, aumentando a perda de carga e permitindo a redução do comprimento do canal para uma mesma vazão (Figura 7).

**Tabela 4.** Características geométricas dos protótipos de labirintos com zonas de vórtice: largura do canal ( $W$ ), altura do dente ( $H$ ), área da seção de fluxo ( $A$ ), coeficiente de perda de carga ( $\varphi$ ), número de defletores ( $N$ ) e comprimento do labirinto ( $L$ )

Protótipo	$W$ (mm)	$H/W$ (-)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$\varphi$	$N$	$L$ (mm)
A1	0,7	1,0	0,49	17,71	23	33,33
A2	0,7	1,2	0,49	21,21	19	27,54
A3	0,7	1,6	0,49	25,32	16	23,19
A4	1,0	1,0	1,00	18,82	44	91,10
A5	1,0	1,2	1,00	24,58	34	70,40
A6	1,0	1,6	1,00	30,09	28	58,00
A7	1,3	1,0	1,69	20,97	67	177,65
A8	1,3	1,2	1,69	28,84	49	131,89
A9	1,3	1,6	1,69	31,84	45	118,43

Fonte: adaptado de (LAVANHOLI, 2019).



**Figura 7.** Parâmetros estruturais do labirinto: largura do canal ( $W$ ), profundidade do canal ( $D$ ), altura do dente ( $H$ ) (a); perfil de distribuição das linhas de fluxo e da velocidade de escoamento

para labirintos com largura do canal de 1 mm e com relação  $H/W$  de 1,0 (b), 1,2 (c) e 1,6 (d).  
Fonte: (LAVANHOLI, 2019).

Um esquema dos labirintos modelo A, gravados na placa de acrílico, é apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5.** Representação dos protótipos modelo A

Modelo	$W$ (mm)	$H/W$	Representação do protótipo
A1	0,7	1,0	
A2	0,7	1,2	
A3	0,7	1,6	
A4	1,0	1,0	
A5	1,0	1,2	
A6	1,0	1,6	
A7	1,3	1,0	
A8	1,3	1,2	
A9	1,3	1,6	

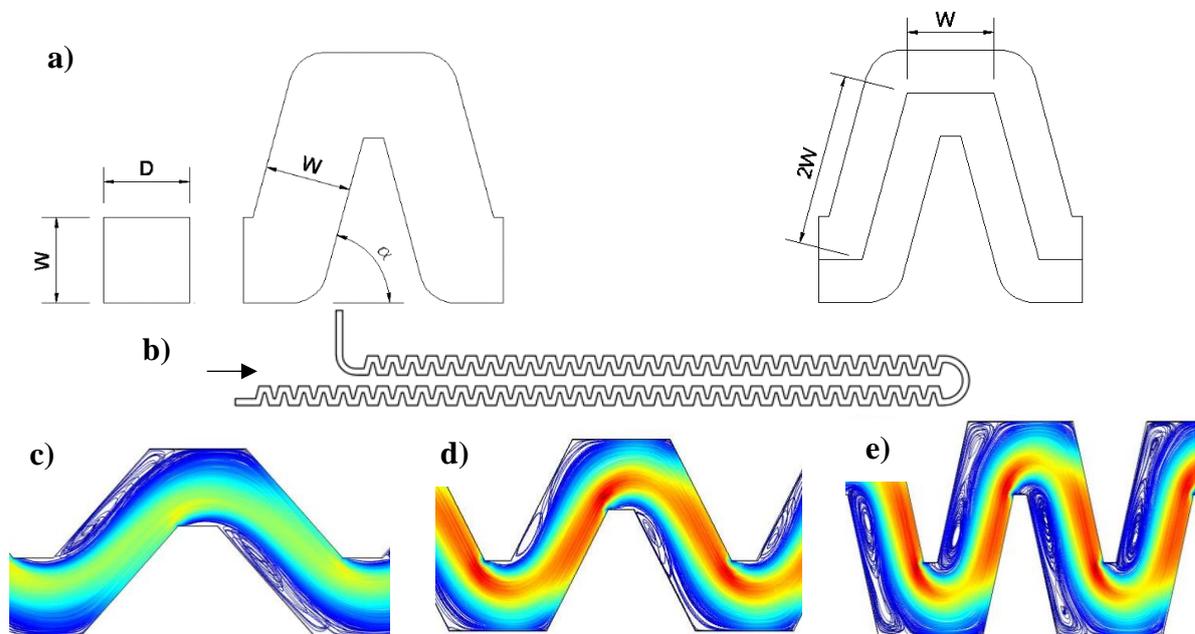
Fonte: adaptado de (LAVANHOLI, 2019).

### 3.1.2 Emissores modelo B

Foram avaliadas 6 geometrias de labirinto projetados para minimizar regiões formadoras de vórtices e favorecer maior seção de fluxo principal, podendo aumentar a capacidade de transporte de partículas ao longo do labirinto (FENG et al., 2018). Além disso,

regiões de vórtices apresentam centro com baixa velocidade de escoamento e, por isso, apresentam baixa capacidade de manter partículas em suspensão nessas regiões, como consequência, as partículas tendem a se sedimentar no labirinto favorecendo o acúmulo e, conseqüentemente, restringindo a passagem de água, podendo levar à obstrução do emissor (ZHANG et al., 2010).

As combinações apresentam variações quanto a largura do canal ( $W$ ), profundidade do canal ( $D$ ) e ângulo do defletor ( $\alpha$ ) (Figura 8). Os canais de escoamento possuem seção de escoamento quadrada (i.e.:  $W = D$ ). Foram avaliados 2 valores de largura e profundidade do canal (0,5 e 0,8 mm) e 3 valores de ângulo do defletor (45, 60 e 75°), resultando em 6 combinações, cujas características geométricas e denominação são mostrados na Tabela 6.



**Figura 8.** Características geométricas do labirinto: largura do canal ( $W$ ), profundidade do canal ( $D$ ), ângulo do dente ( $\alpha$ ) (a); exemplo da estrutura do labirinto com largura de canal de 0,8 mm e ângulo de dente com 75° (b); perfil de distribuição das linhas de fluxo no escoamento para labirintos com ângulos de 45° (c), 60° (d) e 75° (e). Fonte: (LAVANHOLI, 2019).

**Tabela 6.** Características geométricas dos protótipos de labirintos com zonas mínimas de vórtice: largura do canal ( $W$ ), profundidade do canal ( $D$ ), altura do dente ( $H$ ), ângulo do dente ( $\alpha$ ), área da seção de fluxo ( $A$ ), coeficiente de perda de carga ( $\varphi$ ), número de defletores ( $N$ ) e comprimento do labirinto ( $L$ )

Protótipo	$W$ (mm)	$D$ (mm)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$H$ (mm)	$\alpha$ (°)	$\varphi$	$N$	$L$ (mm)
B1	0,5	0,5	0,25	0,71	45	2,23	37	89,32
B2	0,5	0,5	0,25	0,87	60	4,42	18	36,00
B3	0,5	0,5	0,25	0,97	75	8,04	10	15,18
B4	0,8	0,8	0,64	1,13	45	2,31	230	888,42
B5	0,8	0,8	0,64	1,39	60	3,99	133	425,60
B6	0,8	0,8	0,64	1,55	75	7,28	73	177,26

Fonte: adaptado de (LAVANHOLI, 2019).

Um esquema dos labirintos modelo B, gravados na placa de acrílico, é apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7.** Representação dos protótipos modelo B

Modelo	$W$ (mm)	$\alpha$ (°)	Representação do protótipo
B1	0,5	45	
B2	0,5	60	
B3	0,5	75	
B4	0,8	45	
B5	0,8	60	
B6	0,8	75	

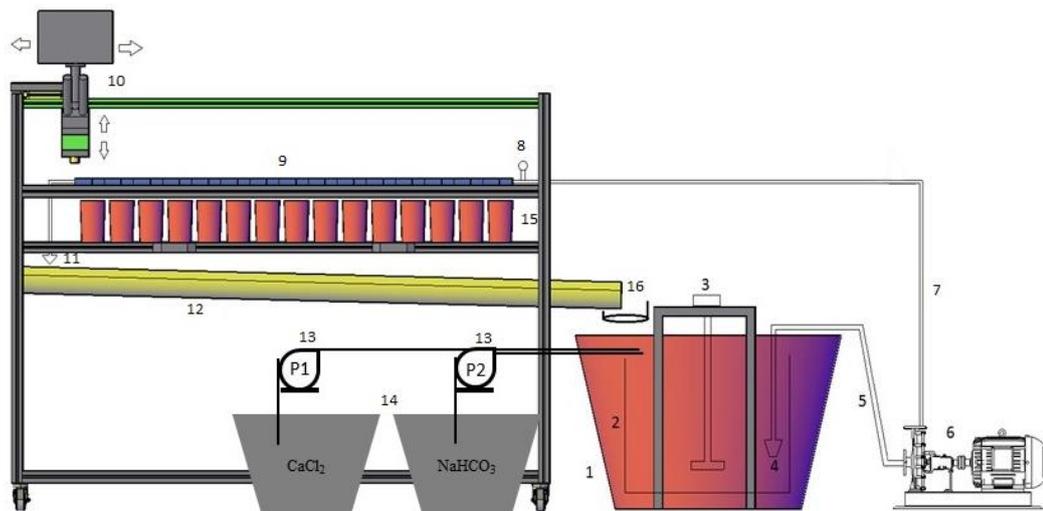
Fonte: adaptado de (LAVANHOLI, 2019).

## 3.2 Ensaio de obstrução

Para avaliação da sensibilidade dos emissores à obstrução, diferentes condições foram testadas com água com diferentes valores de dureza total e contendo partículas sólidas (PS) em diferentes concentrações. A seguir, será descrita a estrutura utilizada para a realização dos ensaios, o protocolo utilizado, a forma de obtenção das partículas sólidas e de preparo da água contendo as espécies que constituem o sistema carbonato, bem como, as diferentes condições estudadas.

### 3.2.1 Bancada de ensaios

A bancada utilizada nos ensaios consistiu em um circuito hidraulicamente fechado equipado com um sistema para aquecimento da água em banho-maria e um sistema de resfriamento com unidade condensadora de 14000 BTU (Figura 9). Um controlador de temperatura foi instalado no circuito da bancada para monitoramento e controle desta variável. O sistema de aquecimento da água foi montado em banho-maria para evitar que a água utilizada nos ensaios entrasse em contato com a resistência elétrica tubular (2 kW), causando a formação de incrustações na superfície da mesma. Um recipiente de alumínio com capacidade de 140 L foi submerso em uma caixa d'água plástica de 250 L. Soluções químicas e PS foram dosados no reservatório interno. Um agitador mecânico com hélice foi utilizado para manter as PS em suspensão, sendo a haste e a hélice fabricados em aço inoxidável, a fim de evitar oxidação e contaminação da mistura. Uma motobomba com rotor e carcaça em aço inoxidável foi utilizada para bombear a mistura a um tubo de polietileno conectado à linha de fluxo principal. A velocidade de escoamento na linha foi de, aproximadamente,  $1 \text{ m s}^{-1}$ , sendo controlada por um bocal de diâmetro apropriado instalado no fim da linha. Foi utilizado um sistema de injeção contínua de solução no reservatório de ensaio, visando manter constante as concentrações de cálcio e de bicarbonato ao longo dos ensaios. Dois recipientes contendo solução estoque de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) (Dinâmica®, Brasil), 0,32 M, e cloreto de cálcio diidratado ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Dinâmica®, Brasil), 0,16 M, foram acoplados à bancada, e duas bombas peristálticas foram responsáveis pelo bombeamento das soluções estoque para o reservatório.



**Figura 9.** Esquema da bancada para ensaios de protótipos de gotejadores. (1) reservatório externo; (2) reservatório interno; (3) agitador mecânico; (4) válvula de pé; (5) tubulação de sucção; (6) conjunto motobomba; (7) tubulação de recalque; (8) manômetro; (9) protótipo de labirinto de gotejador acoplado no acessório de polipropileno; (10) aparato móvel para aquisição de imagens dos protótipos de gotejadores; (11) bocal para controle da velocidade de escoamento no tubo; (12) calha coletora para retorno da água ao reservatório; (13) bombas peristálticas de injeção; (14) reservatórios de solução estoque; (15) coletores; (16) peneira para retenção de partículas contaminantes.

Os suportes com os protótipos de labirintos foram instalados acima de uma calha, responsável por coletar e conduzir ao reservatório a água escoada dos protótipos. Uma peneira com abertura de malha de 150  $\mu\text{m}$  foi instalada no final da calha para reter eventuais contaminantes de granulometria superior à utilizada nos ensaios. Para aquisição de imagens do interior dos labirintos ao longo dos ensaios, foi utilizado um microscópio estereoscópio acoplado a uma câmera de alta resolução (XCAM1080PHA Series HDMI) e tela full HD, instalados sobre um suporte móvel, com deslocamento nos eixos X-Y e ajuste fino em Z.

Uma imagem da bancada é apresentada na Figura 10.

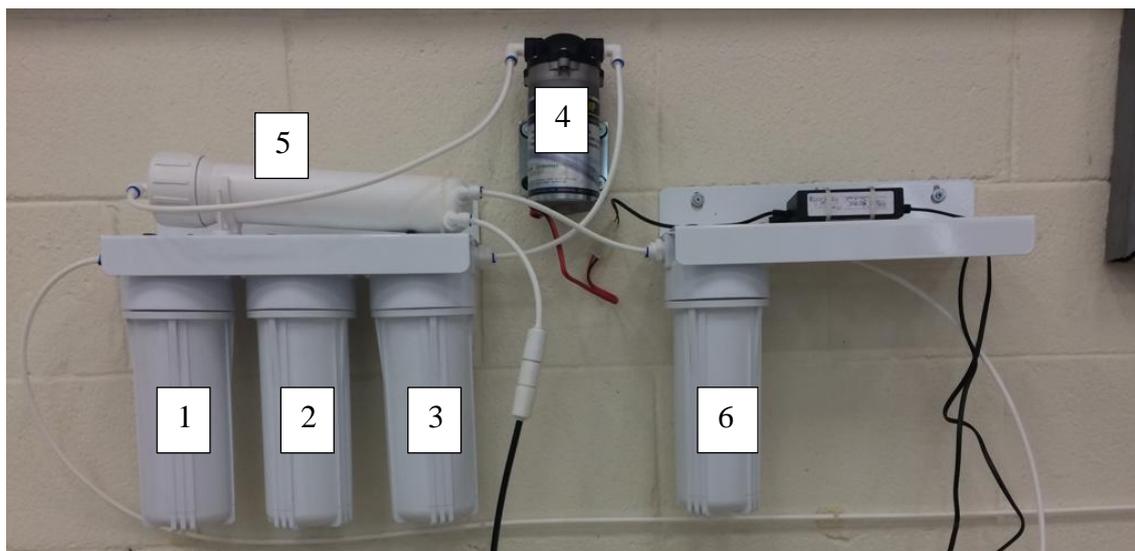


**Figura 10.** Bancada de ensaios com os protótipos de gotejador acoplados aos suportes, câmera para aquisição de imagens e reservatórios.

### 3.2.2 Água utilizada nos ensaios

Durante os ensaios foi utilizada água deionizada a fim de padronizar as condições e qualidade da mesma e evitar a influência de elementos e materiais indesejados causadores de obstrução de emissores. Um sistema de osmose reversa (Figura 11) foi utilizado para purificação da água. A água que abastece a osmose é proveniente do sistema público de abastecimento da cidade de Campinas-SP (SANASA). A unidade purificadora é constituída por um filtro plissado de 10" 5  $\mu\text{m}$ , um filtro de 10" de carvão ativado granular, um filtro de 10" de polipropileno 1  $\mu\text{m}$ , uma bomba pressurizadora, uma membrana de osmose reversa e um filtro de 10" com resina de troca iônica mista.

O controle de qualidade da água proveniente da osmose reversa foi monitorado semanalmente através de medição da condutividade elétrica (CE) da água. A CE foi determinada utilizando-se um condutivímetro da marca Digimed, Modelo DM22, devidamente calibrado com solução padrão 1214  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Durante a pesquisa, a CE da água deionizada não ultrapassou 16  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .



**Figura 11.** Unidade de purificação de água: (1) filtro plissado 10” 5  $\mu\text{m}$ ; (2) filtro 10” de carvão ativado granular; (3) filtro 10” de polipropileno 1  $\mu\text{m}$ ; (4) bomba pressurizadora; (5) membrana de osmose reversa; e, (6) filtro 10” com resina mista.

### 3.2.3 Avaliação da sensibilidade de emissores à obstrução por partículas sólidas (PS)

Nesta etapa, buscou-se avaliar a sensibilidade dos protótipos de gotejadores apenas em relação às partículas de pequena granulometria agindo de modo isolado, e verificar os padrões de deposição no labirinto. As PS utilizadas nos experimentos foram constituídas de uma mistura de areia fina, silte e argila, obtidas a partir de amostra de solo natural, coletado de uma trincheira, a uma profundidade de, aproximadamente, três metros, a fim de evitar a presença de raízes na amostra. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) o solo é classificado como sendo um Latossolo Vermelho Distroférrico (SANTOS et al., 2013).

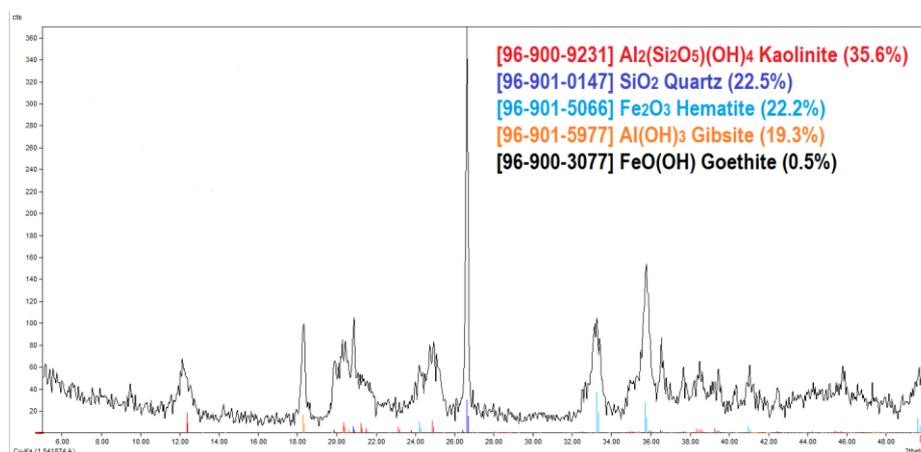
A filtragem mínima normalmente recomendada por fabricantes de gotejadores é de 120 mesh, que equivale à retenção de partículas de granulometria superior a 125  $\mu\text{m}$ . Por este motivo, para o estudo dos processos de obstrução, foi utilizada uma faixa granulométrica única de partículas de solo com tamanho menor que 125  $\mu\text{m}$ . A amostra coletada foi peneirada em malha de 120 mesh (peneira granulométrica em aço inox para análises de solo) e o passante na peneira foi utilizado nos experimentos. Duas concentrações de PS foram avaliadas: 125  $\text{mg L}^{-1}$  e 500  $\text{mg L}^{-1}$ . A menor concentração já representa uma condição severa de risco de obstrução (NAKAYAMA; BUCKS, 1981), enquanto a concentração de 500  $\text{mg L}^{-1}$  tem como objetivo submeter o protótipo de gotejador a uma condição de operação extrema.

As PS foram caracterizadas em relação às principais características químicas de interesse (Tabela 8) e, difração de raios-x (DR-x) foi empregada para identificação das frações minerais constituintes. Um difratômetro de raios-x X'Pert-MPD (Philips Analytical X Ray) foi utilizado nas seguintes configurações: radiação  $K\alpha\text{Cu} = 1,54\text{\AA}$ , (40 kV, 40 mA), com  $\theta$  variando de 0-50, passo angular de  $0,020^\circ$  e tempo de contagem de 1s por passo. O resultado do difratograma do solo é apresentado na Figura 12. A análise de DR-x revelou as seguintes frações minerais: caulinita (35,6%), quartzo (22,5%), hematita (22,2%), gipsita (19,8%) e goethita (0,5%). Nota-se que quase 80% das partículas utilizadas são argilas do tipo 1:1, cujas cargas superficiais no valor de pH das condições de ensaio são, predominantemente, negativas, reveladas pelo ponto de carga zero (PCZ) igual a 6,51 (RIBEIRO et al., 2011).

**Tabela 8.** Principais parâmetros químicos do solo

Parâmetro	Valor	Método	Parâmetro	Valor	Método
M.O. ( $\text{g dm}^{-3}$ )	5,0	Colorimétrico	Cu ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	1,1	DTPA
pH	5,4	Potenciométrico em $\text{CaCl}_2$ 0,01M	Fe ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	3,0	DTPA
P ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	5	Resina	Mn ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	2,6	DTPA
K ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	0,4	Resina	Zn ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	0,3	DTPA
Ca ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ )	9	Resina	H + Al ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ )	13	Tampão SMP
Mg ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ )	3	Resina	S.B. ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ )	12,7	Calculado
Na ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ )	0,3	Acetato de amônio pH 7,0	C.T.C. ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ )	25,7	Calculado
Al ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ )	0	Cloreto de Potássio	V (%)	49,0	Calculado
B ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	0,15	Água quente	PCZ	6,51	EMBRAPA

Notação: M.O. = matéria orgânica; S.B. = soma de bases; C.T.C. = capacidade de troca catiônica; V = saturação de bases; PCZ = ponto de carga zero; DTPA = ácido dietilenotriaminopentaacético.



**Figura 12.** Padrão de DR-x das partículas de solo utilizadas nos ensaios.

Os ensaios foram conduzidos no circuito hidráulico apresentado na Figura 10. A temperatura da água foi mantida em 23 °C (ISO 9261, 2004) e hipoclorito de sódio (10%) foi adicionado diariamente na água a fim de evitar interferências de agentes biológicos e manter uma concentração de cloro residual livre de 3 mg L<sup>-1</sup> na água (PEREIRA et al., 2020). Após adição de hipoclorito de sódio, o pH da água foi reduzido para a faixa de 6,0 – 6,5, através da adição de ácido clorídrico 1M, a fim de evitar precipitação de agentes de natureza química e aumentar a eficiência do hipoclorito de sódio. A cada dois dias, a concentração de sólidos suspensos totais (SST) no tanque era determinada e corrigida, conforme o volume de água que era repostado no reservatório, quando necessário. A metodologia utilizada para a determinação de SST será detalhada na seção 3.4.

### **3.2.4 Avaliação da sensibilidade de emissores à obstrução por precipitados de carbonato de cálcio**

Nesta etapa, foi avaliada a sensibilidade dos protótipos de emissores quanto à obstrução por precipitados de CaCO<sub>3</sub> agindo de modo isolado. Os ensaios foram conduzidos no circuito hidráulico apresentado na Figura 10. A temperatura da água foi mantida em 23 °C ±2 (ISO 9261, 2004) e o pH monitorado continuamente. Nestes ensaios, estabeleceu-se que o valor de dureza total da água fosse mantido em 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> e, numa segunda condição, em 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>, valores que oferecem risco severo e moderado de obstrução de emissores, respectivamente (GOYAL; CHAVAN; TRIPATHI, 2016). Supõe-se que tendências de desempenho de gotejadores podem ser obtidas utilizando a água sintética proposta, não sendo necessário avaliar condições de dureza mais elevadas.

Para determinar o risco de precipitação de CaCO<sub>3</sub>, não basta considerar apenas o valor de dureza da água. É preciso considerar as concentrações de carbonato e bicarbonato, o valor de pH, a temperatura e a concentração de sólidos dissolvidos presentes na água. Essas variáveis podem ser combinadas em índices, chamados de índices de saturação, sendo que o mais utilizado é o Índice de Saturação de Langelier (ISL). Para determinar o risco de precipitação do CaCO<sub>3</sub> em cada condição, neste estudo foi utilizado o ISL, que prevê o risco de precipitação do CaCO<sub>3</sub> com base no conceito de saturação. O ISL tem sido utilizado em diferentes áreas em estudos de precipitação (GHOBADI NIA et al., 2010; SHEIKHOLESLAMI, 2005; VAN DER BRUGGEN et al., 2009) e seu equacionamento é apresentado abaixo:

$$ISL = pH - pH_s \quad (7)$$

onde  $pH$  é o pH medido da amostra de água e  $pH_s$  é o pH de saturação para o  $\text{CaCO}_3$ , que pode ser calculado utilizando as equações (8) e (9):

$$pH_s = p[\text{Ca}^{+2}] + p[\text{HCO}_3^-] + c \quad (8)$$

$$c = pK_{a2} - pK_{ps} - \log \gamma \text{Ca}^{+2} - \log \gamma \text{HCO}_3^- \quad (9)$$

onde  $p[\text{Ca}^{+2}]$  e  $p[\text{HCO}_3^-]$  é o logaritmo negativo da concentração de cálcio e de bicarbonato, respectivamente,  $pK_{a2}$  é o logaritmo negativo da constante de equilíbrio para a dissociação do bicarbonato,  $pK_{ps}$  é o logaritmo negativo da constante do produto de solubilidade para a dissociação do  $\text{CaCO}_3$ ,  $\gamma \text{Ca}^{+2}$  é o coeficiente de atividade do íon cálcio,  $\gamma \text{HCO}_3^-$  é o coeficiente de atividade do íon bicarbonato. Os coeficientes de atividade podem ser calculados usando a equação de Debye-Huckel para soluções de força iônica de até  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  (LINDSAY, 1979):

$$\log \gamma = \frac{0,5 (Z_i^2)(I^{0,5})}{1 + I^{0,5}} \quad (10)$$

$$I = 0,013 CE \quad (11)$$

onde  $\gamma$  é o coeficiente de atividade,  $I$  é a força iônica da solução ( $\text{mol L}^{-1}$ ),  $Z_i$  é a carga das espécies iônicas e  $CE$  é a condutividade elétrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ).

A constante de equilíbrio ( $K_{a2}$ ) e a constante do produto de solubilidade ( $K_{ps}$ ) são funções da temperatura. Diferentes equações foram propostas para expressar a relação entre temperatura e a constante de equilíbrio ( $K_{a2}$ ), e entre temperatura e a constante do produto de solubilidade ( $K_{ps}$ ). De acordo com Ghobadi Nia et al. (2010), a relação mais bem ajustada entre a temperatura e  $K_{ps}$  é a equação quadrática (Eq. 12) e entre a temperatura e  $K_{a2}$  é a equação linear (Eq. 13):

$$K_{ps} = (0,0024T^2 - 0,2519T + 9,325)10^{-9} \quad (12)$$

$$K_{a2} = 9,21 \times 10^{-13}T + 2,3 \times 10^{-11} \quad (13)$$

onde  $T$  é a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Valores positivos do ISL indicam tendência do  $\text{CaCO}_3$  precipitar. Valores entre 0 e 0,5 indicam baixo risco de precipitação, valores entre 0,5 e 1,0 indicam moderado risco de precipitação, valores entre 1,0 e 2,0 indicam alto risco de precipitação e valores acima de 2,0

indicam risco muito alto de precipitação do  $\text{CaCO}_3$  (CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY, 1965; GHOBADI NIA et al., 2010).

Para o preparo da água calcária sintética, cloreto de cálcio dihidratado ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ), de grau analítico, foram utilizados. Os reagentes empregados são comumente empregados em estudos com  $\text{CaCO}_3$ , uma vez que apresentam elevada solubilidade em água e fornece força iônica típica de águas reais. Partindo-se de cálculos estequiométricos considerando a reação de precipitação do  $\text{CaCO}_3$  (Eq. 14), foram obtidas as massas de cada reagente para a obtenção da água de acordo com o valor de dureza alvo, em  $\text{CaCO}_3$ .



Por exemplo, para a obtenção de água com dureza de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , foram efetuados os seguintes cálculos: considerando-se que para a formação de 1 mol de  $\text{CaCO}_3$  são necessários 1 mol de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 2 mols de  $\text{NaHCO}_3$ , e que 1 mol de  $\text{CaCO}_3$ , 1 mol de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e 1 mol de  $\text{NaHCO}_3$  contém 100, 147,01 e 168 g de cada uma dessas substâncias, respectivamente, obtém-se a massa ( $\text{g L}^{-1}$ ) de cada reagente necessária para a obtenção de água com  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  (Eq. 15 e 16):

$$M_{\text{CaCl}_2} = \frac{0,2 \times 147,01}{100} = 0,294 \text{ g} \quad (15)$$

$$M_{\text{NaHCO}_3} = \frac{0,2 \times 168}{100} = 0,336 \text{ g} \quad (16)$$

onde  $M_{\text{CaCl}_2}$  e  $M_{\text{NaHCO}_3}$  é a massa (g) de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e de  $\text{NaHCO}_3$  necessária para obtenção de água com  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ ; 0,2 é o valor correspondente à dureza alvo (g); 147,01 e 168 são as massas molares do  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e do  $\text{NaHCO}_3$ , respectivamente ( $\text{g mol}^{-1}$ ); e, 100 é a massa molar do  $\text{CaCO}_3$  ( $\text{g mol}^{-1}$ ).

A massa obtida de cada reagente foi multiplicada pelo volume de água contido no reservatório de ensaio (80 L), pesada em uma balança analítica (ATX224, Shimadzu; resolução = 0,1 mg) e dissolvidas em água deionizada no reservatório de ensaio. Após o acionamento da motobomba e, transcorrido o tempo de indução, isto é, o período necessário para a formação dos primeiros clusters de  $\text{CaCO}_3$ , o processo de precipitação torna-se contínuo, o que implica na diminuição da concentração dos reagentes no reservatório. Desse modo, visando manter constante as concentrações de cálcio e de bicarbonato no tanque, o sistema de injeção contínua de  $\text{NaHCO}_3$  (0,32 M) e  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0,16 M) foi acionado. A vazão de injeção foi determinada

de acordo com a taxa de decaimento ( $\tau$ ) das concentrações de cálcio e de bicarbonato na água. Para isso, no início de cada ciclo, a dureza da água foi ajustada para o valor alvo e, iniciou-se os ensaios sem a injeção dos reagentes. Após um período pré-estabelecido, efetuou-se leituras das concentrações de cálcio e de bicarbonato, coletando-se alíquotas de amostra na saída da calha de retorno, obtendo, por diferença,  $\tau$  de cada espécie química em função do tempo (Eq. 17):

$$\tau = \frac{[X_0] - [X_t]}{t} \quad (17)$$

onde  $\tau$  é a taxa de decaimento iônico ( $\text{mg L}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $X_0$  é a concentração inicial de  $\text{Ca}^{+2}$  ou de  $\text{HCO}_3^-$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) no reservatório;  $X_t$  é a concentração de  $\text{Ca}^{+2}$  ou de  $\text{HCO}_3^-$  no reservatório após um período  $t$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ); e  $t$  é o tempo entre leituras (h).

O procedimento foi repetido até a obtenção de um valor de  $\tau$  constante. Após a obtenção de  $\tau$ , a vazão das bombas injetoras era ajustada de modo que as concentrações de cálcio e bicarbonato no reservatório permanecessem próximas do valor inicial. Determinações das concentrações de cálcio e de bicarbonato eram efetuadas a cada 2 h, a fim de verificar o comportamento dos mesmos. Quando necessário, a vazão das bombas de injeção era ajustada a fim de se obter as concentrações desejadas. Além das concentrações de cálcio e de bicarbonato, foram analisadas a dureza total, alcalinidade total, o pH, a condutividade elétrica (CE) e a temperatura, continuamente, a fim de monitorar as condições de ensaio.

### **3.2.5 Avaliação da sensibilidade de emissores à obstrução por interações entre partículas sólidas e precipitados de carbonato de cálcio**

Esta etapa visou testar a hipótese de que processos de acúmulo de sedimentos, formação de agregados e de incrustações em labirintos de gotejadores são influenciados por interações entre carbonato de cálcio e partículas sólidas não retidas pelo sistema de filtragem. As mesmas condições e procedimentos descritos em 3.2.3. e em 3.2.4. foram seguidas nos ensaios de interação, com exceção das rotinas de adição de ácido para redução do pH, que foi adotada somente nos ensaios com PS. Nesta etapa, hipoclorito de sódio foi adicionado a fim de evitar desenvolvimento de biofilme, entretanto, o valor de pH não foi reduzido com adição de ácido, uma vez que em pH ácido não haveria formação de precipitados.

Na Tabela 9 encontram-se resumidas as condições nos ensaios de interação.

**Tabela 9.** Condições de ensaio com protótipos de labirintos na condição de interação

Condição	Dureza da água (mg L <sup>-1</sup> em CaCO <sub>3</sub> )	PS (mg L <sup>-1</sup> )
C1	200,0	125,0
C2	200,0	500,0
C3	300,0	125,0
C4	300,0	500,0

### 3.2.6 Rotinas de ensaio

Como é inviável avaliar tempos demasiadamente longos em laboratório, o tempo de exposição de emissores ao risco de obstrução precisa ser arbitrado em valores exequíveis. Faria (2012) adotou tempos de ensaio de 480 h, Rizk et al. (2017) adotaram tempo de 320 h e a proposta de norma ISO/DTR 21540 adota 40 h em cada fase de ensaio, em um total de quatro fases. As três referências mencionam que o tempo total de ensaios foi cumprido em turnos de 8 h de operação por dia. Além disso, os ciclos de desligamento do sistema de bombeamento são essenciais, pois permitem a ocorrência de fenômenos de expulsão de sedimentos e eventual desobstrução parcial de emissores durante a partida do sistema de bombeamento (LAVANHOLI, 2019). Nesta pesquisa, os ensaios foram realizados em ciclos de 12 h, sendo 10 h operando e 2 h em repouso. Cada condição de ensaio durou 20 ciclos, totalizando 200 h de operação (10 dias). A maior duração dos ensaios em relação ao valor proposto na norma ISO/DTR 21540 visa possibilitar investigação mais abrangente acerca do acúmulo de sedimentos nos protótipos de labirintos.

Após o término de cada condição de ensaio, foi realizada a higienização da bancada de ensaios e dos emissores, a substituição da água utilizada e o preparo de nova mistura correspondente a condição de ensaio desejada. A cada quatro ciclos foi mensurada a vazão dos emissores por determinação de massa de água.

### 3.3 Avaliação de desempenho dos protótipos de emissor

Três aspectos principais foram utilizados a fim de avaliar o efeito das diferentes condições de qualidade da água no desempenho dos protótipos: 1) quantitativo: avaliando a razão entre a vazão atual e a vazão inicial de cada gotejador (vazão relativa); 2) qualitativo: avaliando padrões de deposição e zonas de acúmulo de sedimentos/precipitados no interior do labirinto; e, 3) acúmulo de massa: determinação da massa depositada no labirinto no final de cada ensaio.

Em relação ao aspecto quantitativo, os modelos de protótipos que apresentaram vazão relativa inferior a 75% foram considerados como obstruídos (PEREIRA et al., 2020; WEI

et al., 2008; ZHANG et al., 2017). A vazão relativa foi calculada conforme Pereira et al. (2020) (Eq. 18):

$$q_r = 100 \frac{q_i}{q_0} \quad (18)$$

em que:  $q_r$  é a razão entre a vazão atual e a vazão inicial do emissor (%);  $q_i$  é a vazão atual do emissor ( $L h^{-1}$ ); e  $q_0$  é a vazão inicial do emissor, operando com água limpa ( $L h^{-1}$ ).

As informações sobre o comportamento das partículas nos labirintos e os locais em que ocorrem o acúmulo e formação de depósitos de  $CaCO_3$  foram determinadas por meio de imagens e filmagem dos canais utilizando uma lupa equipada com câmera de alta resolução para a captura de imagens e visualização dos labirintos estudados. O procedimento de filmagem também pode ser útil para a determinação do tempo necessário para que ocorra a obstrução ou acúmulo de partículas e formação de depósitos de  $CaCO_3$  no labirinto, ou ainda, após ocorrer o acúmulo e depósito, observar se os labirintos apresentam capacidade de autolimpeza, ou seja, após a sedimentação de partículas e formação de incrustação, verificar se há ou não a remoção desses depósitos pelo fluxo da água. As imagens foram registradas em diversos pontos do labirinto, principalmente nos primeiros defletores do canal, a cada 40 h de operação do sistema, sendo realizadas nos mesmos dias em que a vazão era determinada.

### **3.4 Análises físico-químicas**

#### **3.4.1 Determinações analíticas**

Todas as análises foram realizadas de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). Foram analisadas as concentrações de cálcio (APHA – 3500-Ca B), bicarbonato (APHA – 2320 B) e carbonato (APHA – 2320 B), a dureza total (APHA – 2340 C), a alcalinidade total (APHA – 2320 B), o pH, a condutividade elétrica (CE) (APHA – 2510 B) e a temperatura (APHA – 2550 B), continuamente, a fim de monitorar as condições de ensaio. As concentrações de cálcio, bicarbonato e carbonato, a dureza total e a alcalinidade foram determinadas por titulometria. O pH e a CE foram medidos utilizando-se um pHmetro (DM-22, Digimed) e um condutímetro (DM-22, Digimed), respectivamente; e, finalmente, a temperatura foi medida utilizando um sensor de temperatura PT100. Nos ensaios apenas com PS foi monitorada a concentração de sólidos suspensos totais (SST), determinada por gravimetria (APHA – 2540 D).

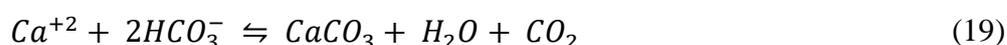
### 3.4.2 Difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura

O material depositado no interior do labirinto dos emissores foi recolhido para obtenção de imagens em microscópio eletrônico de varredura (MEV), a fim de verificar mudanças no comportamento morfológico do CaCO<sub>3</sub> na presença de PS. O material particulado foi espalhado sobre uma fita de carbono em um stub de metal e, em seguida, as amostras foram metalizadas com Au<sub>(s)</sub> e analisadas através de um microscópio eletrônico de varredura (JEOL SM-5800LV) com um sistema de captura de imagem (SemAfore 5.21), operando a 15kV. A determinação das fases cristalinas do precipitado foi obtida a partir de dados de difração de raios-x com refinamento pelo método de Rietveld. Os difratômetros foram registrados com  $\theta$  variando de 5-70, passo angular de  $^{\circ}2\theta$ , tempo de contagem de 0,5 s por passo e no intervalo de radiação  $K\alpha\text{Cu} = 1,5406\text{\AA}$ , (40 kV, 45 mA).

### 3.5 Mecanismos de interação e cinética de precipitação

A fim de compreender e esclarecer a influência da concentração de PS na nucleação e crescimento dos cristais de CaCO<sub>3</sub>, testes em béquer foram realizados fixando a dureza da água em 300 mg L<sup>-1</sup> e variando a concentração de PS (0, 125, 250, 500, 750 e 1000 mg L<sup>-1</sup>) na água.

A técnica da precipitação de CaCO<sub>3</sub> pelo método de desgaseificação do CO<sub>2</sub> dissolvido foi empregada nesta etapa. Essa técnica foi desenvolvida pela primeira vez em 1994 por Roques et al. (1994) e tem sido usada em muitos estudos (HASSON; CORNEL, 2017; LIENDO et al., 2021; MENZRI; GHIZELLAOUI; TLILI, 2017b). Seu princípio é baseado no deslocamento do equilíbrio calcocarbônico na direção da precipitação do CaCO<sub>3</sub> pela desgaseificação do CO<sub>2</sub> dissolvido (Eq. 19) e assim, permite controlar as mudanças na concentração de CO<sub>2</sub> dissolvido, que é o principal fator que afeta a precipitação.



Água destilada foi utilizada nesses ensaios. 0,5 L de CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O (1,5x10<sup>-3</sup> M) e 0,5 L de NaHCO<sub>3</sub> (3,0x10<sup>-3</sup> M) foram preparados a fim de obter água com dureza de 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>. No início de cada teste, as soluções foram filtradas utilizando-se membrana filtrante nitrato de celulose 0,45  $\mu\text{m}$ , a fim de remover impurezas que pudessem interferir na nucleação (WANG et al., 2018). As soluções foram misturadas em um béquer de 1 L e agitadas a 1500 rpm em agitador magnético durante 6 h (AVARO et al., 2019; SOUSA; SIGNORELLI; BERTRAN, 2016). O pH e a condutividade elétrica da solução foram registrados continuamente; e, nos primeiros 30 min, a cada 5 min, 5 mL da solução eram retirados para

análise das concentrações de cálcio e de bicarbonato por titulação. Decorridos 30 min após o início dos ensaios, as leituras foram registradas em intervalos de 20 min, visto que após esse período o sistema tende a se estabilizar e as taxas de decaimento das concentrações iônicas e mudanças no sistema tornam-se mais lentas.

As fases de supersaturação, nucleação e de crescimento foram determinadas com base na curva de pH versus tempo (QIAN et al., 2019; REIS et al., 2018). No final de cada teste, a massa de  $\text{CaCO}_3$  precipitada foi lavada com água destilada e filtrada em membrana filtrante nitrato de celulose 0,45  $\mu\text{m}$ , secada em estufa com circulação forçada de ar a 70 °C durante 2 h (KAROUI et al., 2010; REIS et al., 2018) e pesada em balança analítica para a determinação da fração precipitada. A temperatura da água foi mantida em  $25 \pm 1$  °C em todos os testes.

### **3.6 Simulação utilizando fluidodinâmica computacional**

Fluidodinâmica computacional foi utilizada como ferramenta auxiliar a fim de se obter os campos de velocidade do fluxo e distribuição das linhas de corrente no labirinto dos emissores. O módulo CFD do COMSOL Multiphysics V.5.4. foi utilizado para executar as simulações numéricas. As simulações assumiram um fluido newtoniano incompressível (ou seja, água) e condições de estado estacionário. O modelo  $k - \epsilon$  padrão foi utilizado para resolver o escoamento turbulento. As funções de parede log-law foram aplicadas para aproximar o perfil de velocidade do fluxo dentro da camada limite. A qualidade da malha foi examinada com base na qualidade mínima e média do elemento (assimetria). Como condições de contorno, adotou-se pressão de entrada nos emissores igual a pressão de escoamento na linha, ou seja, 100 kPa, e velocidade de escoamento na seção de saída do emissor. A velocidade foi calculada utilizando a equação da continuidade que relaciona a vazão e a área da seção de escoamento de cada modelo.

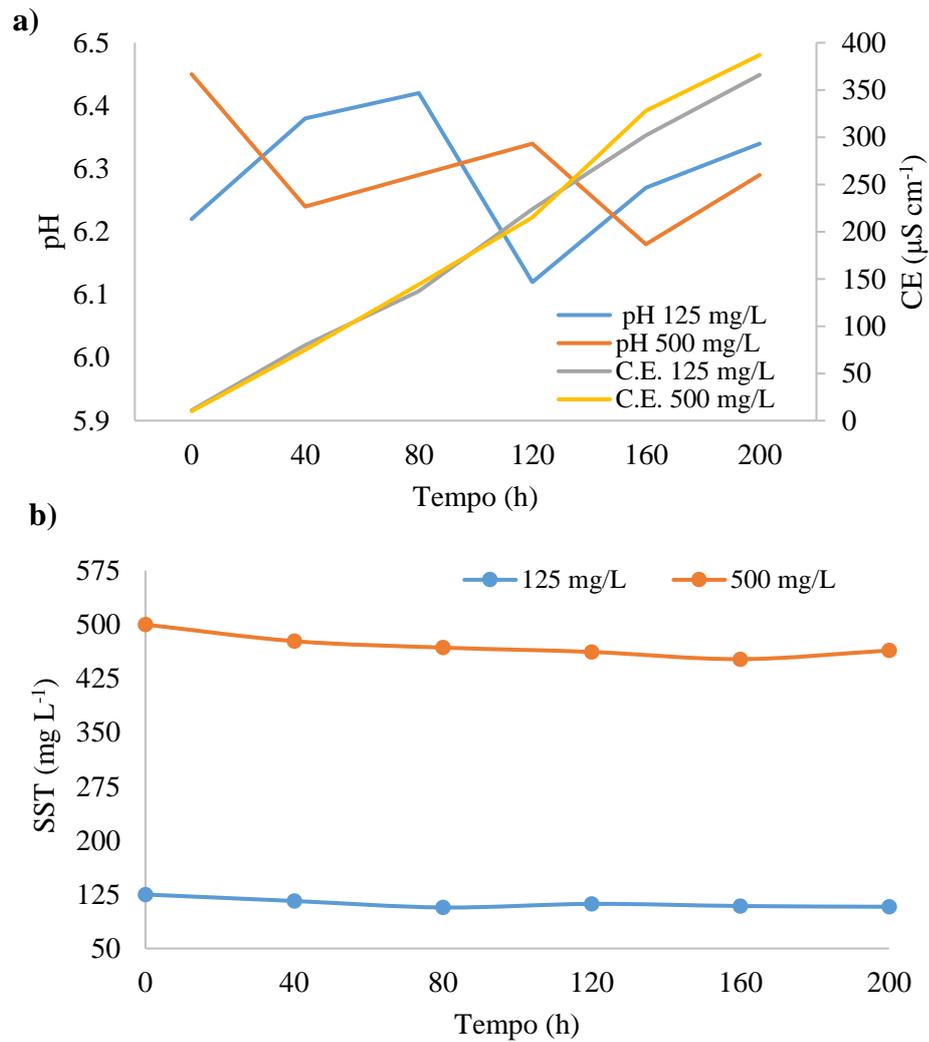
## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Obstrução por partículas sólidas**

#### **4.1.1 Desempenho dos protótipos de labirintos**

Na Figura 13 é mostrada a variação do pH, da CE e da concentração de SST na água durante os ensaios para avaliação da sensibilidade dos emissores à obstrução por PS. Nota-se, na Figura 13a, que o valor máximo e o valor mínimo do pH foi 6,45 e 6,12, respectivamente, mantendo-se na faixa esperada. Valores de pH nessa faixa são desejáveis nos ensaios de obstrução apenas com PS, pois além de inibir a formação de possíveis precipitados químicos, aumentam a eficiência do hipoclorito de sódio como agente sanitizante. Isso evita a interferência de agentes de natureza química e biológica que poderiam contribuir para a obstrução dos emissores. O aumento gradual na CE da água é explicado devido às rotinas de cloração que, conseqüentemente, aumentam a concentração de sólidos dissolvidos na água.

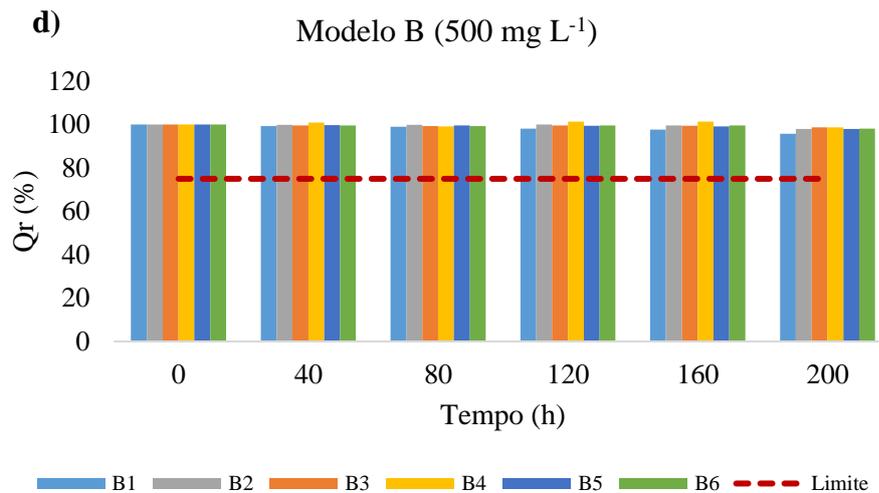
Na Figura 13b é mostrada a variação da concentração de SST na água. Nos ensaios com  $125 \text{ mg L}^{-1}$  o valor mínimo observado de PS foi de  $107 \text{ mg L}^{-1}$ , o que indica que, ao longo dos ensaios, os valores de SST permaneceram acima de  $100 \text{ mg L}^{-1}$ , indicando condição severa de risco de obstrução (NAKAYAMA; BUCKS, 1981). Já nos ensaios com  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS, o valor mínimo de SST observado foi de  $452 \text{ mg L}^{-1}$ , o que reflete que os emissores estavam operando em condição extrema de risco de obstrução por PS. A diminuição da concentração de SST na água em relação ao início dos ensaios pode ser explicada devido ao acúmulo das partículas no labirinto e em outros componentes do sistema hidráulico, além disso, respingos da água para fora da bancada contribuíam para a perda de PS. Devido a isso, eram realizadas reposições de PS na água sempre que necessário. Ressalta-se que, ainda com essas perdas, a concentração de SST na água permaneceu dentro do esperado, validando os resultados obtidos.



**Figura 13.** (a) Valores de pH e de condutividade elétrica (CE) da água e (b) concentração de sólidos suspensos totais ao longo dos ensaios para avaliação da sensibilidade dos emissores à obstrução por PS.

A vazão relativa ( $Q_r$ ) dos protótipos de emissores ao longo dos ensaios é mostrada na Figura 14. Como critério de obstrução, na literatura, tem sido considerado que um modelo encontra-se obstruído quando apresenta  $\pm 25\%$  de variação de vazão, em relação à vazão inicial (FENG et al., 2018; ZHANG et al., 2017; PEREIRA et al., 2020).





**Figura 14.** Vazão relativa dos protótipos de gotejadores ao longo do tempo em diferentes condições. (a) modelo A com  $125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS; (b) modelo B com  $125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS; (c) modelo A com  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS; (d) modelo B com  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS.

Na Figura 14, nota-se que os protótipos não obstruíram até o final das 200 h de ensaio, independente da concentração de PS na água. A  $Q_r$  foi pouco afetada. Alguns modelos de emissores, como o modelo A3 (Figura 14c) e o modelo A6 (Figura 14a), apresentaram  $Q_r$  maior que 100% em determinadas medições. Esse fato pode ser atribuído ao acúmulo de partículas nas regiões de vórtices, afetando as características de escoamento e o desempenho hidráulico do emissor. Emissores do modelo A apresentam vórtices bem desenvolvidos. O acúmulo gradual de sedimentos na região de vórtices (câmaras de vórtices) pode reduzir a magnitude dos vórtices, o que diminui a queda de pressão por defletor e conduz a ligeiros aumentos na vazão do emissor (YU et al., 2019; ZHANG et al., 2007). A máxima redução de vazão observada foi de 4,3% para o emissor modelo B1 na condição de  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS na água, estando muito abaixo do limiar crítico que caracteriza a obstrução, conforme o critério adotado ( $Q_r < 75\%$ ), podendo, assim, dizer que essa redução na vazão não foi significativa para fins de classificação de obstrução.

Os resultados observados indicam que partículas menores que  $125 \mu\text{m}$ , como agentes isolados de obstrução, não apresentam potencial para a obstrução de emissores, independente da concentração utilizada. Embora a literatura indique que águas com concentrações de sólidos suspensos acima de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  ofereça risco severo de obstrução de emissores, os resultados aqui observados demonstram que, independentemente da concentração de PS na água, o tamanho das partículas poderá ser o fator que irá determinar o risco de obstrução. Essa afirmação pode ser sustentada baseada nos resultados observados por

Lavanholi (2019). Utilizando esses mesmos emissores em ensaios com protocolo diferente – i.e.: 4 faixas granulométricas ( $<75 \mu\text{m}$ ,  $75 - 125 \mu\text{m}$ ,  $125 - 212 \mu\text{m}$ ,  $212 - 500 \mu\text{m}$ ) e  $125 \text{ mg L}^{-1}$  de partículas de cada faixa, totalizando  $500 \text{ mg L}^{-1}$  – o autor observou que os protótipos foram extremamente sensíveis à obstrução. Todos os modelos de escoamento uniforme e parte dos modelos de escoamento com vórtice (A1, A2 e A3) obstruíram rapidamente. Ainda de acordo com o autor, a maioria dos labirintos foram obstruídos por partículas com dimensões superiores à largura do canal, e este fenômeno se deu em função da heterogeneidade das características geométricas do material de obstrução utilizado nos ensaios.

Algumas partículas podem apresentar formato quase esférico, enquanto outras podem ser estreitas e alongadas, o que irá facilitar sua passagem pelos crivos da peneira durante o preparo do material de ensaio. Essas partículas, quando entram no labirinto do emissor, estão sujeitas a deslocamento e rotação devido a mudanças na direção de fluxo e gradiente de velocidade de escoamento do fluido na seção transversal do canal. Esses fenômenos podem ser responsáveis por fazer com que essas partículas fiquem atravessadas no canal, retenham outras partículas de granulometria menor e interrompam o fluxo de água.

Como referência prática, a abertura da malha de filtragem nos sistemas de irrigação por gotejamento deve ser de  $1/10$  da menor dimensão da seção de escoamento do labirinto (LAMM; AYARS; NAKAYAMA, 2006; USDA, 2013). Partículas com tamanho maior podem escapar pelo sistema de filtragem e atingir os emissores de diferentes modos, levando à interrupção do fluxo de água. Ao avaliarem a influência de parâmetros geométricos de labirintos de emissores na resistência à obstrução, Li et al. (2006) observaram que a maioria das partículas que causaram obstrução de emissores poderiam ter sido evitadas de entrarem no sistema de irrigação, caso tivesse sido utilizada malha de filtragem com abertura de  $1/10$  da largura do canal.

Resultados semelhantes aos observados neste estudo foram observados por Oliveira et al. (2020), avaliando processos de obstrução de emissores por partículas de argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ). Esses autores observaram que a deposição de partículas dentro dos labirintos de gotejadores foi maior nas zonas de vórtices, localizadas nos primeiros defletores dos labirintos. As variações de vazão observadas pelos autores não foram suficientes para classificar os emissores como obstruídos em nenhuma das condições estudadas. Os autores concluíram que partículas de argila, como agente isolado de obstrução, não apresentaram potencial para obstrução total de emissores nas condições testadas.

Com relação aos parâmetros geométricos do labirinto, não foi possível avaliar a influência dos mesmos na capacidade anti-obstrução dos emissores nos ensaios com PS, uma

vez que nenhum dos modelos estudados obstruíram ou tiveram a  $Q_r$  afetada de modo considerável. Entretanto, foi possível verificar tendências no padrão de deposição, como será discutido no próximo tópico.

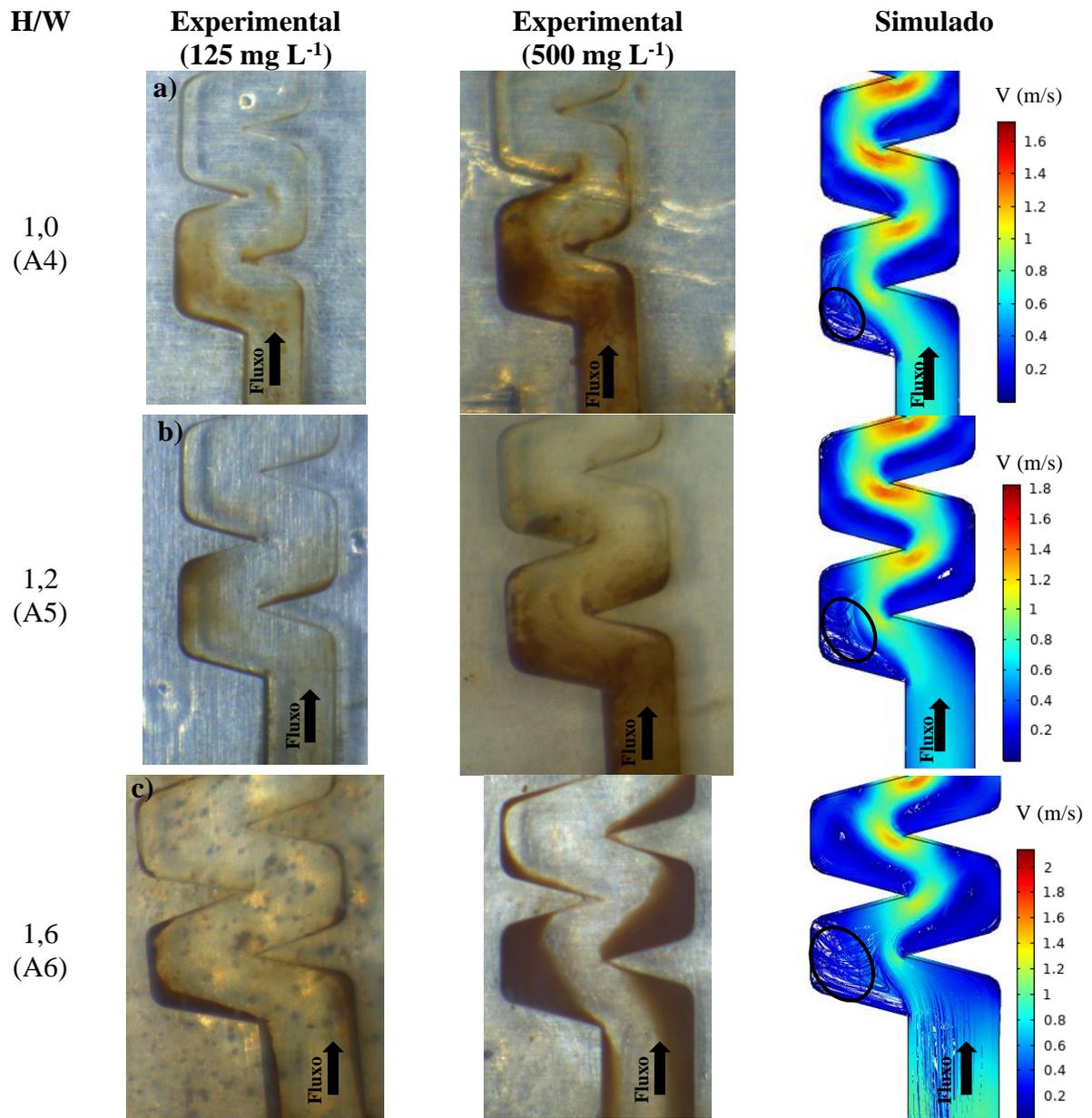
#### **4.1.2 Padrões de deposição de PS**

A fim de avaliar as características de escoamento no interior dos labirintos, simulações utilizando fluidodinâmica computacional foram realizadas, e as linhas de fluxo nos labirintos dos protótipos são mostradas e comparadas com imagens obtidas dos canais. As imagens apresentadas correspondem ao décimo dia, ou seja, final dos ensaios, após 200 h de operação dos emissores. A Figura 15 corresponde aos emissores de escoamento com vórtices A4, A5 e A6.

Na Figura 15 é possível observar que a deposição de PS ocorreu principalmente nos primeiros defletores do labirinto, independentemente da relação  $H/W$ . No primeiro defletor é possível verificar que houve formação de distintas áreas com características diferentes de escoamento. Há locais que são preferenciais para a deposição de PS, assim como há um local preferencial de fluxo. O aumento na concentração de PS na água aparentemente não modificou os padrões de deposição, entretanto, é possível observar que houve aumento significativo na quantidade de material depositado. Ainda assim, o conteúdo de material depositado não foi suficiente para provocar alteração significativa na  $Q_r$  dos emissores.

Comparando as imagens obtidas com as linhas de fluxo simuladas, observa-se que os locais de deposição coincidem com as regiões nas quais foram observadas velocidades de escoamento mais baixas. Essas regiões correspondem às zonas de vórtices e às zonas de estagnação, que são as regiões periféricas próximas à parede do canal. Nessas zonas, a velocidade de escoamento observada é menor que  $0,8 \text{ m s}^{-1}$ , e não foi suficiente para carrear as partículas para fora do emissor. Nota-se, ainda, que a região de fluxo principal foi formada no centro do labirinto e apresenta velocidades de escoamento superiores a  $0,8 \text{ m s}^{-1}$ , chegando a  $2,0 \text{ m s}^{-1}$  no emissor A6. Maiores velocidades foram observadas no topo do dente do canal e, nesses locais, não há vestígios de PS depositadas. Os resultados observados estão em estreita concordância com trabalhos reportados na literatura em relação às zonas de deposição de partículas. Ait-Mouheb et al. (2019) observaram que a deposição de caulinita ocorreu principalmente no primeiro defletor do labirinto, o que estaria relacionado à baixa velocidade de escoamento e à baixa energia cinética turbulenta devido à mudança na direção do fluxo do escoamento na entrada do canal. Zhang et al. (2010) também observaram que a baixa

turbulência no primeiro defletor é responsável pela retenção de partículas que se sedimentam e ocasionam a interrupção do fluxo de água.



**Figura 15.** Regiões de acúmulo de sedimentos no defletor e linhas de fluxo nos protótipos (a) A4, (b) A5 e (c) A6.

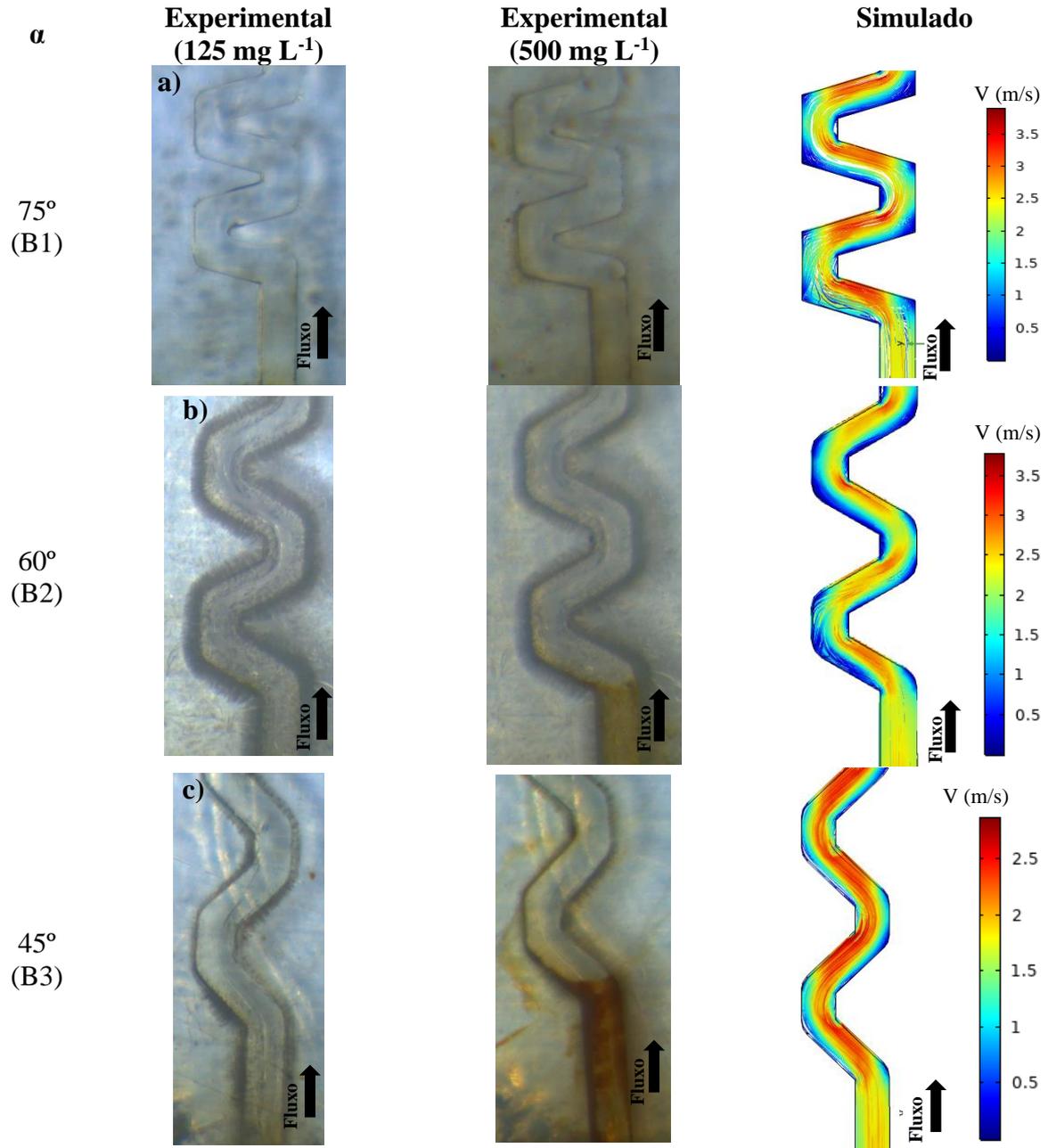
O aumento na relação H/W ocasionou no aumento das regiões de vórtices e estreitamento da região de fluxo principal. Aparentemente, o aumento na relação H/W de 1,0 para 1,2 não impactou significativamente a deposição de PS, entretanto, a deposição foi bastante acentuada no emissor com H/W de 1,6, podendo-se concluir que o aumento da relação H/W para valores maiores que 1,6 aparentemente não é vantajoso em relação à deposição de PS. Mesmo apresentando zonas de intensa deposição, é possível observar no modelo A6 uma região

bem definida de fluxo principal com ausência de PS e que corresponde à zona de alta velocidade. Os resultados sugerem que as câmaras de vórtices bem desenvolvidas poderiam ser um aspecto construtivo vantajoso em emissores, pois, além de serem zonas de dissipação de carga de pressão, serviriam como locais para a deposição de eventuais PS, que poderiam interferir na taxa de descarga dos emissores. Entretanto, uma vez que o tempo de ensaio foi limitado a 200 h, os resultados ainda são incipientes para tal afirmação. O acúmulo gradual de partículas nessa zona poderia comprometer o desempenho do emissor em períodos longos de uso. Desse modo, é ideal que tais partículas fossem, de fato, carregadas junto ao escoamento. Alguns estudos de otimização de labirintos sugerem eliminar as regiões de baixa velocidade e arredondar as regiões de canto, de modo que o próprio fluxo possa lavar as paredes e eliminar as partículas que, porventura, viessem a se depositar (QINGSONG et al., 2008; YANG et al., 2020; ZHANG et al., 2007).

A deposição de PS em canais de emissores do Modelo B é mostrada na Figura 16, bem como os perfis de velocidade de escoamento na seção do canal.

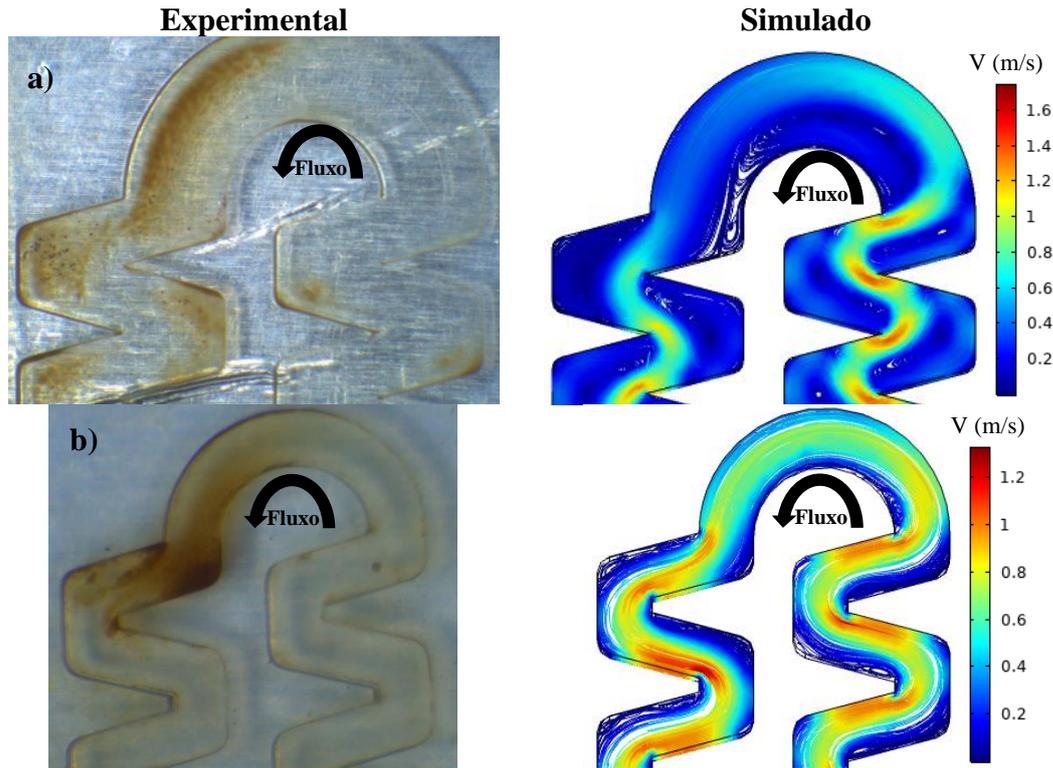
Diferente dos emissores de escoamento com vórtices, os emissores do modelo B, cujo escoamento tende a ser mais uniforme no labirinto, não apresentaram deposição de PS nos defletores, apenas na região de entrada quando a concentração de PS na água foi aumentada para  $500 \text{ mg L}^{-1}$ . As linhas de fluxo mostram que o escoamento se estabiliza rapidamente nesses labirintos, e apresenta velocidades elevadas ao longo de todo o canal. Observa-se que o aumento da inclinação do ângulo do dente resultou na formação de zonas mínimas de vórtices, porém, esses vórtices são pouco desenvolvidos e pouco influenciam o desempenho hidráulico do emissor. Embora os emissores não tenham obstruídos, Yu et al. (2018) observaram que labirintos que apresentam defletores mais inclinados foram mais susceptíveis à obstrução, uma vez que labirintos com ângulos de  $45^\circ$  obstruíram mais rapidamente que os labirintos com ângulos de  $75^\circ$ .

Para analisar a sensibilidade desses modelos à obstrução, recomenda-se a realização de mais ensaios com maior tempo de duração. Assim, será possível distinguir quais características geométricas que mais influenciam a deposição e a obstrução de emissores por partículas de granulometria inferior a  $125 \mu\text{m}$ .



**Figura 16.** Regiões de acúmulo de sedimentos no defletor e linhas de fluxo nos protótipos (a) B1, (b) B2 e (c) B3.

Também foram observadas tendências de deposição de material nos trechos de labirintos que apresentam curvas de aproximadamente 180°, ou seja, labirintos muito grandes que necessitam serem gravados em zigue-zague (Figura 17).



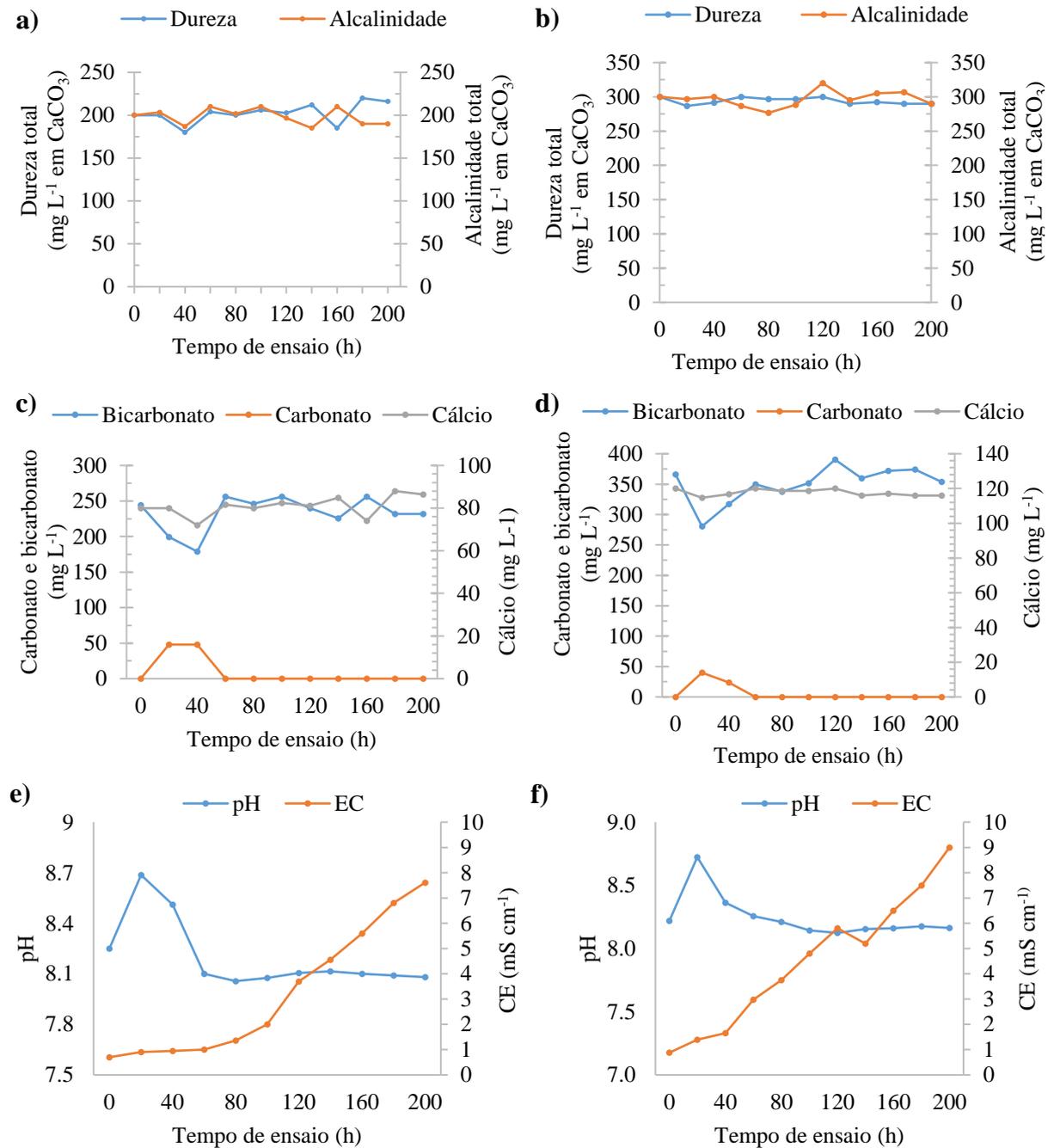
**Figura 17.** Padrão de deposição de PS e perfis de velocidade de escoamento nos modelos A9 (a) e B6 (b).

É comum labirintos de gotejadores comerciais apresentarem esse design, uma vez que isso permite a fabricação de gotejadores mais compactos. Mudanças na direção de fluxo resultam em diminuição da energia cinética turbulenta e da velocidade de escoamento, favorecendo a sedimentação de partículas nos defletores seguintes. Apesar de não ter sido observado impacto significativo dessa configuração na vazão dos emissores, ressalta-se que esse tipo de design pode ser uma desvantagem construtiva no projeto de gotejadores.

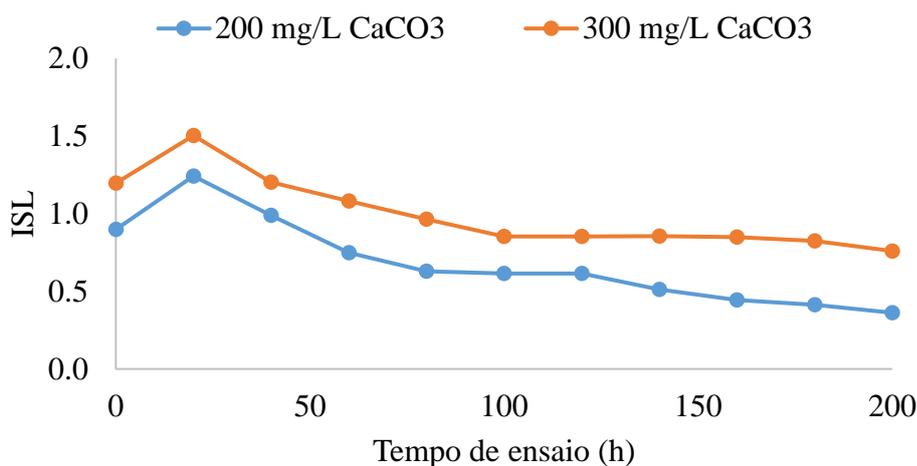
## 4.2 Obstrução por precipitados de $\text{CaCO}_3$

### 4.2.1 Desempenho dos protótipos de labirintos

Os valores médios diários de dureza, alcalinidade, concentração de íons cálcio, bicarbonato e carbonato, pH e CE da água são apresentados na Figura 18. Já os valores calculados do ISL são mostrados na Figura 19. A temperatura da água permaneceu entre 23 e 25°C em todos os ensaios.



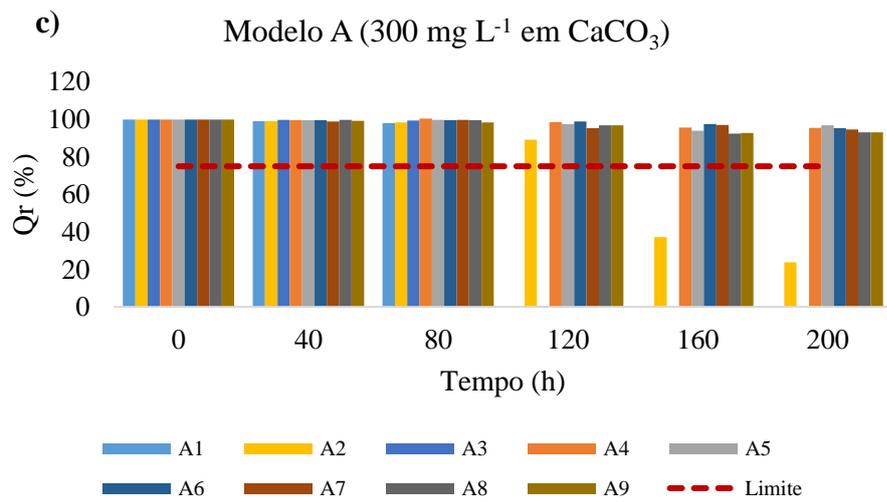
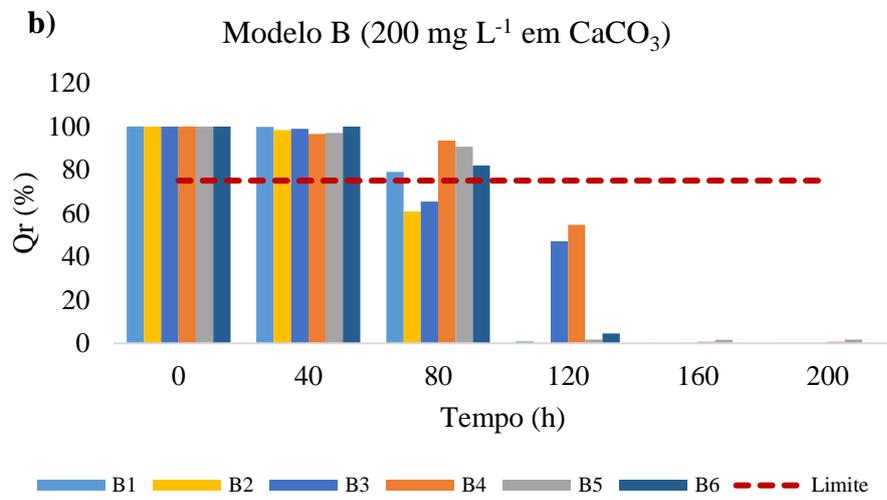
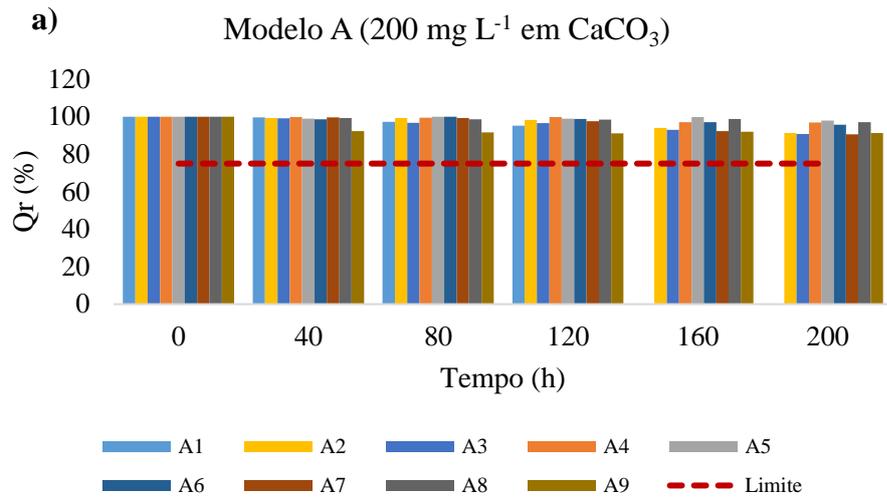
**Figura 18.** Valores médios diários de: dureza e alcalinidade da água, nos tratamentos com água calcária com dureza de (a) 200 e (b) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>; concentração de íons cálcio, bicarbonato e carbonato, nos tratamentos com água calcária com dureza de (c) 200 e (d) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>; e, variação do pH e da CE da água, nos tratamentos com água calcária com dureza de (e) 200 e (f) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>.

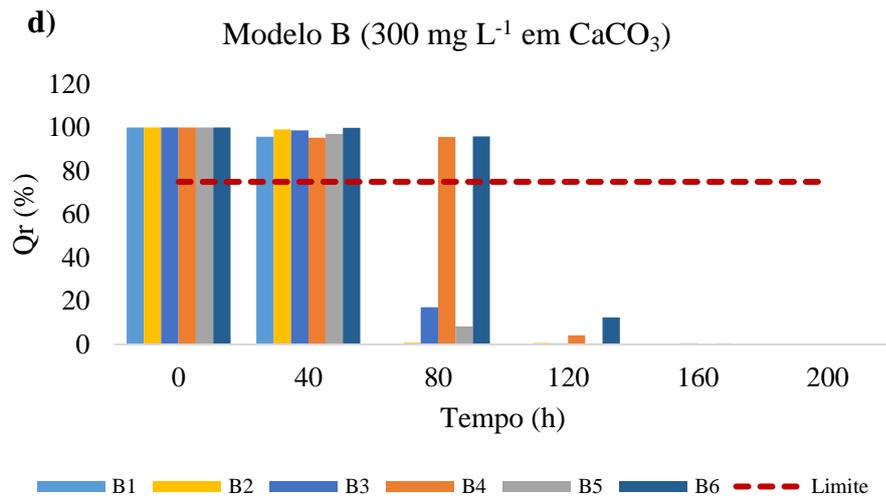


**Figura 19.** Variação do ISL da água nos experimentos com água com dureza de 200 e 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>.

Observa-se na Figura 18 pouca variação da concentração de cálcio e bicarbonato, o que é desejado para manter as características da água uniformes ao longo dos ensaios. Nos primeiros dias de ensaio, nota-se uma diminuição da concentração de bicarbonato, que é compensada pelo aumento da concentração de carbonato. Isso é explicado devido ao aumento do pH na fase de saturação, ou seja, no início dos ensaios, o pH aumenta até um determinado valor (pH de saturação - *pH<sub>s</sub>*). O tempo transcorrido para que isso aconteça é chamado de período de indução. Após atingir o período de indução e começar a formar os primeiros cristais, o pH diminui e, conseqüentemente, diminui também a concentração de carbonato, que agora é compensada pelo aumento do conteúdo de bicarbonato, conforme mostram as Figura 18c e 18d. O período de indução e o *pH<sub>s</sub>* variam de acordo com a saturação do sistema. Sistema mais saturados tendem a apresentar maiores valores de *pH<sub>s</sub>* e menores tempos de indução. Essas variáveis foram estudadas e serão discutidas com mais detalhes nos ensaios de interação. Na Figura 19, nota-se que o ISL variou de 0,4 a 1,2 nos ensaios com dureza de 200 mg L<sup>-1</sup> e de 0,8 a 1,5 nos ensaios com dureza de 300 mg L<sup>-1</sup>. O aumento do ISL nas primeiras horas é explicado pelo aumento do valor de pH.

A vazão relativa dos emissores ao longo dos ensaios apenas com água calcária é apresentada na Figura 20.





**Figura 20.** Vazão relativa dos protótipos de gotejadores ao longo do tempo em diferentes condições. (a) modelo A com dureza de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ ; (b) modelo B com dureza de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ ; (c) modelo A com dureza de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ ; (d) modelo B com dureza de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ .

Conforme a Figura 20a, nos ensaios com água calcária, cuja dureza foi de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , dos emissores do modelo A, apenas o modelo A1 obstruiu. O modelo A1 apresentou Qr igual a zero com 160 h de operação. Entre os emissores do modelo A, os modelos A2 e A3 são os que mais se assemelham ao modelo A1, diferindo na relação H/W, sendo que o modelo A1 é o que apresenta menor relação H/W. Os modelos A2 e A3 apresentaram Qr igual a 91,3 e 90,7% no final dos ensaios, respectivamente, indicando redução parcial na Qr, entretanto, a redução observada não foi suficiente para classificá-los como obstruídos.

Quando a dureza da água foi aumentada para  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , verificou-se que os modelos A1 e A3 obstruíram com 120 h e o modelo A2 obstruiu com 160 h de operação. Os outros emissores do modelo A permaneceram com Qr acima de 90% durante todo o ensaio, indicando bom desempenho anti-obstrução em águas com diferentes níveis de saturação com relação ao  $\text{CaCO}_3$ . Entre os emissores modelo A, os modelos A1, A2 e A3 são os que apresentam menor área de escoamento ( $0,49 \text{ mm}^2$ ) e zonas de formação de vórtices menos desenvolvidas quando comparados aos demais. Tais características aproximam esses emissores aos emissores do modelo B, que apresentam seção de escoamento de  $0,25$  e  $0,64 \text{ mm}^2$  e zonas mínimas de vórtices durante o escoamento. Os emissores do modelo B também apresentaram baixo desempenho operando nessas condições (Figura 20b e 20d).

Ainda na Figura 20b, pode-se observar que todos os emissores do modelo B obstruíram com 120 h de operação. Em comparação com a condição na qual foi utilizada água

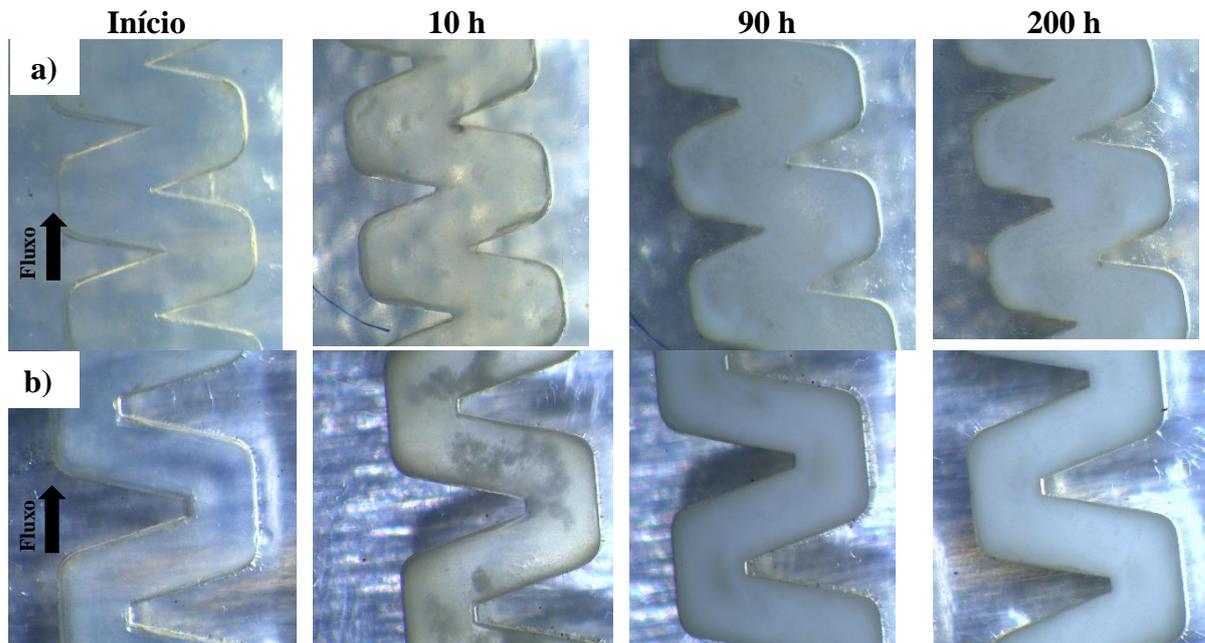
com maior índice de saturação (Figura 20d), verifica-se o mesmo comportamento de obstrução, porém os emissores atingiram o limiar crítico de  $Q_r$ , que caracteriza a obstrução, em menor tempo de operação, 80 h, com exceção dos modelos B4 e B6, que obstruíram com 120 h. Entre os emissores modelo B, os modelos B4, B5 e B6 são os que apresentam maior área de seção de escoamento ( $0,64 \text{ mm}^2$ ), portanto, os resultados sugerem que emissores que apresentam menor seção de escoamento são mais sensíveis à alteração na vazão devido à incrustação de  $\text{CaCO}_3$ . Os modelos B4, B5 e B6 se diferenciam em relação ao ângulo do defletor, sendo que o modelo B4 apresenta ângulo de  $45^\circ$  enquanto o Modelo B6 apresenta ângulo de  $75^\circ$ . Uma vez que a obstrução dos emissores modelo B foi detectada em um mesmo momento de medição de vazão, não foi possível distinguir quais as características geométricas desses emissores que mais influenciaram os processos de deposição e incrustação e, conseqüentemente, a  $Q_r$ . Para a identificação dessas características, as medições de vazão deveriam ter ocorrido em intervalos de tempo mais curtos. Entretanto, em função do baixo desempenho desses modelos, não é recomendado estudos futuros com essas geometrias, indicando-se focar nos emissores do modelo A, que além de terem apresentado bom desempenho, apresentam características geométricas de labirinto mais próximas dos emissores comerciais.

De modo geral, nos ensaios com água calcária, emissores com menor área de escoamento foram mais susceptíveis à obstrução por depósitos de  $\text{CaCO}_3$ . Essa relação pode ser explicada em função de dois mecanismos envolvidos no processo de cristalização do  $\text{CaCO}_3$ : crescimento e aglomeração de cristais. A aglomeração é um fenômeno comum quando se tem altas supersaturações e cristais relativamente pequenos. A aglomeração ocorre na presença de forças de coesão entre dois ou mais cristais que permanecem juntos por um tempo suficiente para crescerem na forma de entidades cristalinas estáveis que os contém, com propriedades e formas altamente irregulares. Por vezes, essas entidades cristalinas podem ocluir pequenas quantidades de solução mãe levando ao aumento do cristal, ou mesmo, podem aderir outros cristais em crescimento, sendo que, ambos os processos originam cristais maiores. Assim, emissores que apresentam seção de escoamento relativamente menores são mais susceptíveis à obstrução completa do canal em menor tempo de operação devido à aglomeração resultar em material depositado de tamanho maior (COSMO et al., 2019; COSTA; GIULIETTI, 2010; WÓJCIK; JONES, 1998). De modo similar, no processo de crescimento de cristais, emissores com seção de escoamento menor serão desfavorecidos, uma vez que estes tendem a obstruir o canal mais rapidamente em função da área limitada para o crescimento cristalino. Além destes dois mecanismos citados, a hidrodinâmica no interior do canal também pode ser relatada como um dos principais fenômenos responsáveis pelos processos de deposição,

incrustação, remoção e quebra dos cristais, conforme será discutido na próxima seção (BAYAT et al., 2012; CHENG et al., 2009; MACIEL et al., 2019; YANG, 2020).

#### 4.2.2 Padrões de deposição de $\text{CaCO}_3$

Imagens do interior dos labirintos são apresentadas na Figura 21, as quais representam a evolução no processo de depósito de  $\text{CaCO}_3$  no labirinto do emissor no ensaio com água com dureza de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ .



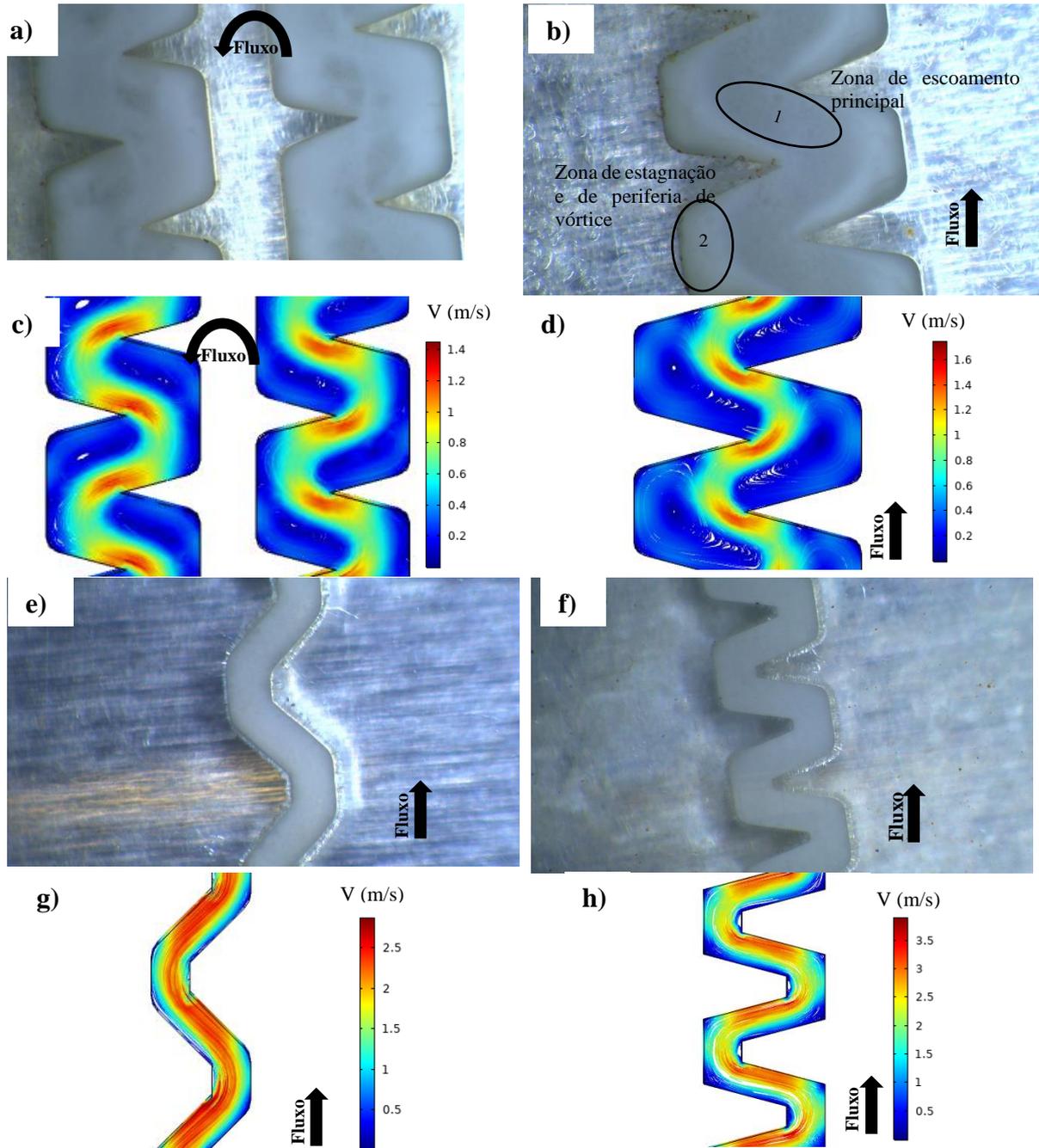
**Figura 21.** Evolução da formação de depósito de  $\text{CaCO}_3$  no labirinto do emissor: (a) emissor modelo A3 e (b) emissor modelo B6.

Para ambos os modelos, pode-se observar que o processo de incrustação de  $\text{CaCO}_3$  no labirinto ocorreu de maneira gradual ao longo do tempo, entretanto, no modelo A3, cujo escoamento proporciona a formação de zonas de vórtices, não foi observado a obstrução completa do canal, indicada pelo valor de  $Q_r$  no final dos ensaios ( $Q_r = 90,7\%$ ). Ainda assim, é possível notar, no final de 200 h de ensaio, que o labirinto desse modelo se encontrava parcialmente ocupado por depósitos de  $\text{CaCO}_3$ , mas não foi suficiente para provocar alterações significativas na vazão. Do contrário, o emissor B6 apresentou o labirinto completamente obstruído por precipitado de  $\text{CaCO}_3$ , apresentando  $Q_r$  igual a zero no final das 200 h de ensaio.

Em outras imagens do interior dos labirintos dos emissores (Figura 22) foi constatado que o processo de deposição e formação de incrustação de  $\text{CaCO}_3$  ocorreu em todo o labirinto apresentando-se de maneira praticamente uniforme em todo o canal, diferente dos

processos de deposição de PS que, conforme os resultados apresentados na seção 4.1.2, foi altamente dependente das condições hidrodinâmicas no canal. O processo de formação de incrustação de  $\text{CaCO}_3$  pode ocorrer de dois modos, sendo que na maioria dos sistemas ocorrem de modo concomitante. No primeiro, os cristais formados em solução podem se depositar nas superfícies e paredes formando a incrustação, nesse caso, a deposição é influenciada por parâmetros do escoamento, bem como as características das partículas, como o tamanho e velocidade, além de propriedades do fluido, como sua massa específica e viscosidade (COSMO et al., 2019). No segundo modo, os cristais se formam diretamente na própria superfície ou nas paredes e, nesse caso, não é necessário a deposição para que haja incrustação. No primeiro modo, a nucleação é dita como homogênea, pois não necessitou de uma superfície para ocorrer, já no segundo, é dita heterogênea. A nucleação heterogênea é mais comum, mas o mecanismo homogêneo torna-se mais provável à medida que o grau de supersaturação aumenta (REIS et al., 2018; SOUSA; SIGNORELLI; BERTRAN, 2016; VAZIRIAN et al., 2016). Em sistemas dinâmicos, discernir esses mecanismos não é tão simples e, na literatura há controvérsia sobre a ocorrência de cada uma dessas formas de nucleação. Nesse estudo, especificar o tipo de nucleação em função da geometria e relacioná-las aos padrões de deposição, exigiria experimentos adicionais e específicos para esta finalidade, o que não foi objetivo da tese.

De qualquer modo, analisando as imagens da Figura 22, pode-se constatar algumas tendências de deposição em função da geometria do canal. Para emissores do modelo A (Figura 22a e 22b) percebe-se que o aumento na relação  $H/W$  aproximou os padrões de deposição e linhas de fluxo simuladas no labirinto. No modelo A9 ( $H/W = 1,3$ ) (Figura 22b), a zona do defletor com menor intensidade de incrustação foi a zona de escoamento principal, que apresenta maior velocidade de escoamento. Já no modelo A7 ( $H/W = 1,0$ ) (Figura 22a), observa-se que a zona de escoamento principal não está tão bem definida e, aparentemente, há menor tendência de a incrustação seguir os padrões das linhas de fluxo simuladas. De modo similar, nos emissores do modelo B, que apresentam zonas mínimas de vórtices, não está nítido a influência das linhas de fluxo no padrão de deposição. Entretanto, pode-se destacar que as linhas de fluxo simuladas nos emissores do modelo B (Figura 22g e 22h) são mais homogêneas e caracterizadas por representar altas velocidades em todo o defletor. Nos emissores do modelo B, os padrões de deposição também mostram que a incrustação ocorreu de forma homogênea em todo o defletor e que não há locais preferenciais de deposição (Figura 22e e 22f).



**Figura 22.** Padrões de deposição e formação de incrustação de  $\text{CaCO}_3$  e linhas de fluxo nos emissores no tratamento com água calcária com dureza de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ . (a) e (c) emissor A7; (b) e (d) emissor A9; (e) e (g) emissor B1; (f) e (h) emissor B3.

Cosmo et al. (2019) citam que os processos de deposição e incrustação de  $\text{CaCO}_3$  são altamente dependentes das condições de escoamento, podendo ocorrer em dois passos: primeiro ocorre o transporte do cristal para a superfície; e, depois, a ligação do cristal com essa superfície. Segundo Collins (2002), existem seis mecanismos de transportes que permitem que o cristal já formado alcance a superfície de escoamento, sendo eles: movimento de partícula causado por forças eletrostáticas; deposição devido a forças gravitacionais; deposição devido à

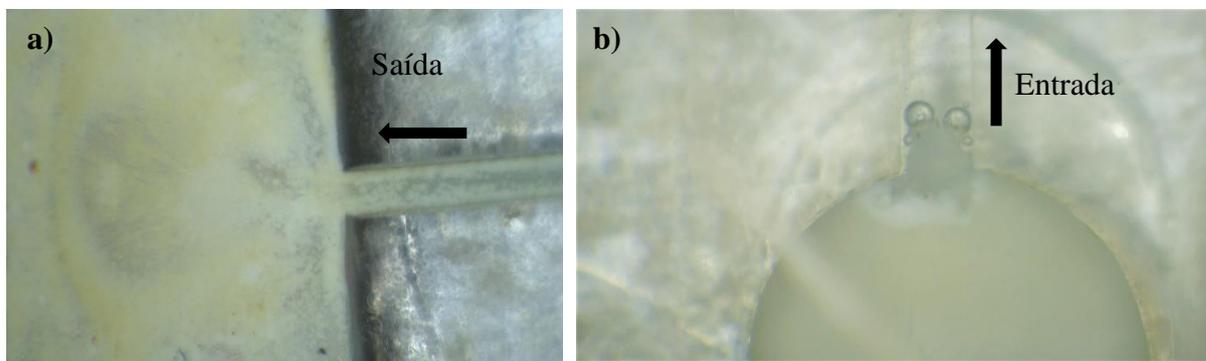
dispersão cisalhante e forças cisalhantes; difusão Browniana; transporte devido a forças inerciais; e, difusão turbulenta. Assim, nos emissores de escoamento turbulento, os depósitos observados nas regiões de baixa velocidade podem ser atribuídos aos cristais já formados, que se depositaram devido a forças gravitacionais. Esse mecanismo seria semelhante ao que ocorre com partículas sólidas, as quais se depositam em zonas específicas, que normalmente apresentam baixa velocidade e pouco arraste (AIT-MOUHEB et al., 2019).

Por outro lado, a presença de cristais na zona de escoamento principal estaria relacionada a três possíveis fenômenos. Na primeira suposição, a nucleação heterogênea é responsável pelo surgimento de cristais em quaisquer zonas do labirinto que estejam em contato com a solução supersaturada. Desse modo, à medida que os cristais se formam e crescem aderidos à superfície do canal, sua área superficial aumenta, atraindo mais moléculas e promovendo o crescimento a uma taxa cada vez maior (SÖHNEL; MULLIN, 1988). Na segunda suposição, ocorre a nucleação homogênea de cristais de  $\text{CaCO}_3$ , e os maiores são depositados na região de fluxo principal, por serem pesados o suficiente para não serem arrastados para as zonas de canto e em direção à saída do emissor, já que a velocidade de escoamento no canal pode ser insuficiente para arrastar estruturas cristalinas maiores. Seguida da deposição, ocorre a aderência dos mesmos na zona de escoamento principal (OJANIEMI et al., 2012). A terceira suposição está relacionada às rotinas de desligamento da bomba. Quando ocorre a interrupção abrupta do fluxo no canal, toda a água existente no labirinto tende a escoar em direção à região de fluxo principal, levando consigo cristais que se depositaram em regiões de baixa velocidade. Esses cristais se concentram na região central do emissor formando a incrustação. A evaporação da água que ocorre durante o período em que o sistema fica desligado também favorece o aumento da saturação do meio em relação ao  $\text{CaCO}_3$ , aumentando a taxa de precipitação (GHOBADI NIA et al., 2010). Vazirian et al. (2016) observaram que a taxa de formação de incrustação de  $\text{CaCO}_3$  em oleodutos é controlada predominantemente pela nucleação heterogênea e pelo crescimento do cristal, em vez da adesão de partículas pré-cristalizadas. Neste estudo, supostamente os três fenômenos ocorreram, e é importante destacar que, durante as rotinas de desligamento da bomba, era comum observar o arraste de cristais para a região de fluxo principal, principalmente nos ensaios com interação de  $\text{CaCO}_3$  e PS.

A formação de incrustação também foi observada na região de entrada e na região de saída dos emissores (Figura 23). Incrustação de  $\text{CaCO}_3$  na saída dos emissores é explicada pelo *flushing* de  $\text{CO}_2$  devido a despressurização do sistema na saída do canal, sendo que o efeito da pressão parcial de  $\text{CO}_2$  na precipitação da calcita é relatado em diferentes estudos (COSMO et al., 2019; FU; VAN BERK; SCHULZ, 2013; KAN; TOMSON, 2010; RIZK et al., 2017;

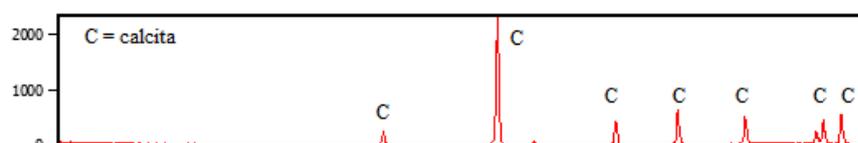
VAN BERK; FU; SCHULZ, 2015). Também foi observado que a área de entrada do emissor é um fator crítico que merece destaque nos processos de obstrução por  $\text{CaCO}_3$ . Notadamente, emissores que possuem menor área de escoamento são propensos a grandes depósitos de  $\text{CaCO}_3$  na entrada do canal. Isso pode ser explicado devido ao crescimento de cristais que se depositam nesta zona.

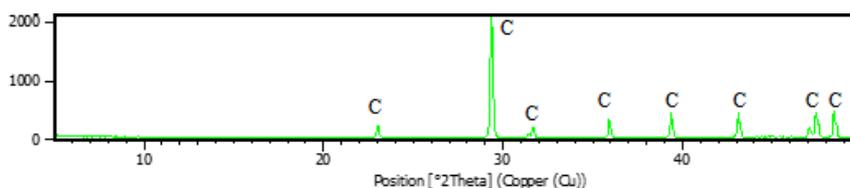
Resultados semelhantes são reportados na literatura (RAMACHANDRULA; KASA, 2020). Ramachandrula e Kasa (2020) sugerem que devem ser feitas modificações na geometria do labirinto de modo que a área de entrada tenha aberturas maiores. Se por um lado o projeto de emissores com entradas de labirintos maiores poderia retardar o processo de obstrução, por outro, uma vez que há depósito de cristais numa superfície, mecanismos de aglomeração serão favorecidos e, certamente, entidades cristalinas maiores e mais estáveis serão formadas; assim, com o tempo, mesmo emissores com maior área de abertura poderão ser obstruídos completamente por depósitos de  $\text{CaCO}_3$ . Modificações na geometria ou na superfície dos emissores que permitam escoamento com mecanismos de quebras do cristal aderido ou de não aderência são sugeridos nesse estudo como maneiras mais efetivas para a prevenção da obstrução por  $\text{CaCO}_3$  a longo prazo.



**Figura 23.** Depósitos de  $\text{CaCO}_3$  (a) na saída e (b) na entrada do emissor Modelo B2.

Difração de raios-x foi empregada a fim de identificar a fração mineral do polimorfo  $\text{CaCO}_3$  formado no interior dos emissores. A análise qualitativa da fase foi realizada por meio do software que acompanha o equipamento com auxílio do banco de dados PDF-2/Release 2010 RDB da PANanalytical, número da versão 2.1002. Os resultados são mostrados na Figura 24.





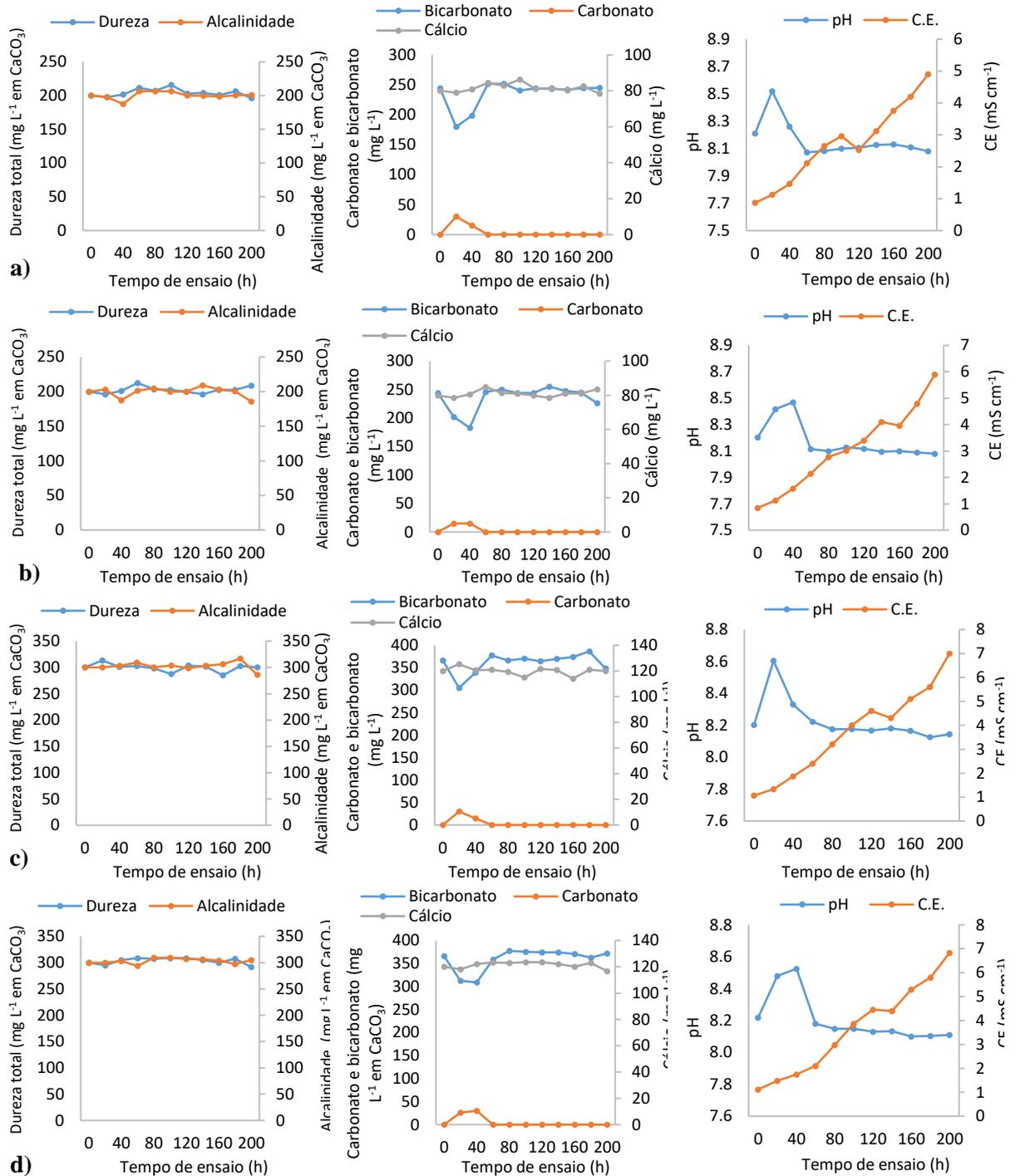
**Figura 24.** Difratoogramas obtidos do  $\text{CaCO}_3$  precipitado no interior dos labirintos utilizando água com dureza de (A) 300 e (B) 200  $\text{mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ .

Em ambas as condições de ensaio foi verificado que a calcita era a forma predominante do  $\text{CaCO}_3$ . Esse resultado se justifica em função da temperatura de ensaio ( $23^\circ\text{C}$ ), na qual há maior chance de formação de calcita. Dentre os polimorfos anidros do  $\text{CaCO}_3$ , a calcita é a menos solúvel e, termodinamicamente, a fase mais estável, seguida pela aragonita e vaterita (CHANG et al., 2017; RAMACHANDRULA; KASA, 2020; RIZK et al., 2017). Os resultados observados estão em conformidade com estudos de Rizk et al. (2017). Estes autores, avaliando os parâmetros que controlam depósitos químicos em microirrigação, observaram que a calcita foi a forma mineral predominante, seguida pela vaterita.

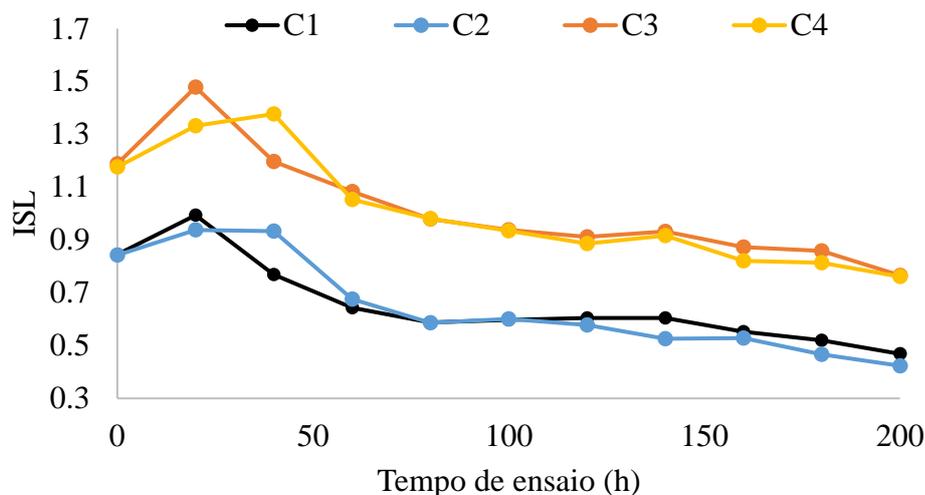
### 4.3 Obstrução por interação entre partículas sólidas e precipitados de $\text{CaCO}_3$

#### 4.3.1 Desempenho dos protótipos de labirintos

Os resultados apresentados na Figura 25 correspondem às características da água durante os experimentos de interação. Os valores de cada variável refletem diretamente no grau de saturação do  $\text{CaCO}_3$ , que também pode ser indicado pelo ISL, apresentado na Figura 26 para cada condição ensaiada. Valores positivos do ISL indicam tendência do carbonato de cálcio precipitar e, sua magnitude mostra a gravidade do risco potencial de precipitação (LANGELIER, 1946). Na Figura 26, observa-se que, para uma dada condição de mesmo valor de dureza da água, os valores de ISL foram muito próximos, indicando padrão nas condições de ensaio. O aumento no ISL nas primeiras horas de ensaio se deve ao aumento repentino no valor de pH na fase de saturação, correspondente ao período de indução, isto é, período até a formação dos primeiros clusters de  $\text{CaCO}_3$ . Após esse período, os cristais formados tendem a crescer e o pH diminui até próximo do seu valor inicial (MENZRI; GHIZELLAOUI; TLILI, 2017b; REIS et al., 2018).



**Figura 25.** Variação da dureza, alcalinidade, cálcio, bicarbonato, carbonato, pH e condutividade elétrica da água nos ensaios com gotejadores nas seguintes condições: (a) 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 125 mg L<sup>-1</sup> de PS; (b) 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 500 mg L<sup>-1</sup> de PS; (c) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 125 mg L<sup>-1</sup> de PS; e, (d) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 500 mg L<sup>-1</sup> de PS.

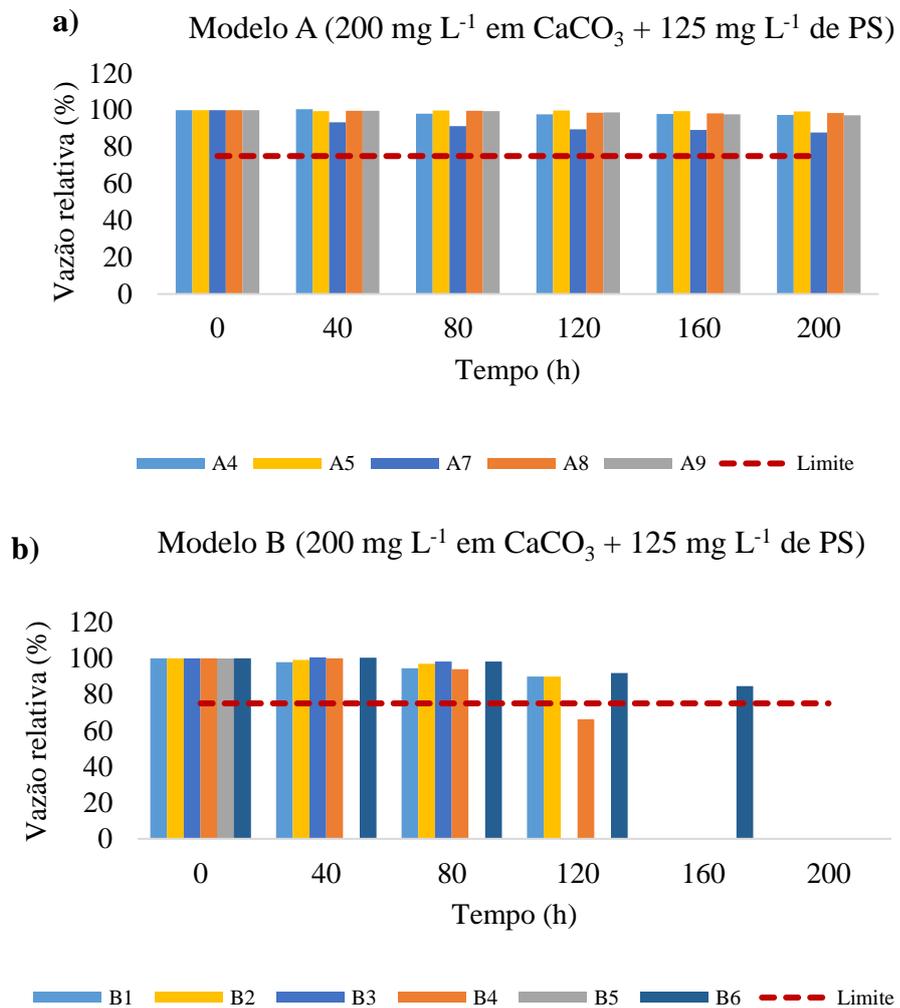


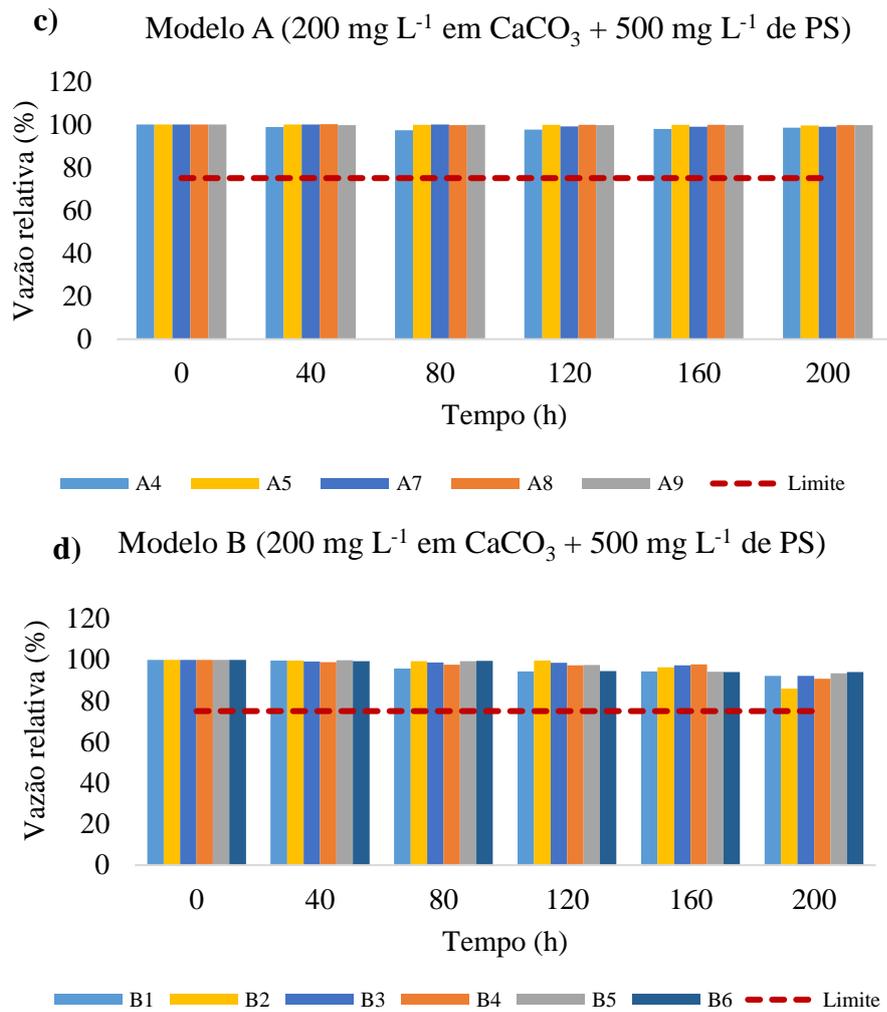
**Figura 26.** Variação do ISL da água nas seguintes condições: (C1) 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 125 mg L<sup>-1</sup> de PS; (C2) 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 500 mg L<sup>-1</sup> de PS; (C3) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 125 mg L<sup>-1</sup> de PS; (C4) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 500 mg L<sup>-1</sup> de PS.

Na Figura 27 são mostradas as vazões relativas dos protótipos de gotejadores nos tratamentos com água calcária de 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>. Nos ensaios de interação, 4 protótipos de emissores foram descartados por terem sofrido abrasão nos dentes, alterado as condições de escoamento e, conseqüentemente, a vazão. Foram eles: A1, A2, A3 e A6, sendo todos eles pertencentes ao modelo A. Novos protótipos com as mesmas características foram construídos, entretanto, percebeu-se ao longo do experimento que o desgaste do dente ocorria antes de completar os ensaios e, conseqüentemente, havia alteração na vazão desses emissores. Assim, optou-se por eliminar esses modelos nos ensaios de interação. O poder abrasivo da água nesses ensaios provavelmente se deve à combinação das características químicas da água com as PS e as condições hidrodinâmicas de escoamento. Os emissores afetados apresentam velocidades mais elevadas em relação aos demais.

Comparando os resultados apresentados na Figura 27 com os resultados apresentados na Figura 20, que mostram o impacto dos depósitos de CaCO<sub>3</sub> na Q<sub>r</sub> dos emissores na ausência de PS, observa-se que os protótipos de gotejadores foram mais sensíveis à variação de vazão nos ensaios com ausência de PS (Figura 20). A deposição e formação de incrustação do CaCO<sub>3</sub> ocorreu em maior magnitude nas condições de ausência ou de menor concentração de PS na água, onde foi observada a obstrução completa de todos os gotejadores do modelo B. Nos ensaios com água calcária de 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 125 mg L<sup>-1</sup> de PS, foi observado impacto na Q<sub>r</sub> de emissores modelo B a partir de 40 h de operação. Com 160 h de operação, todos os emissores do modelo B encontravam-se obstruídos, com exceção do modelo B6,

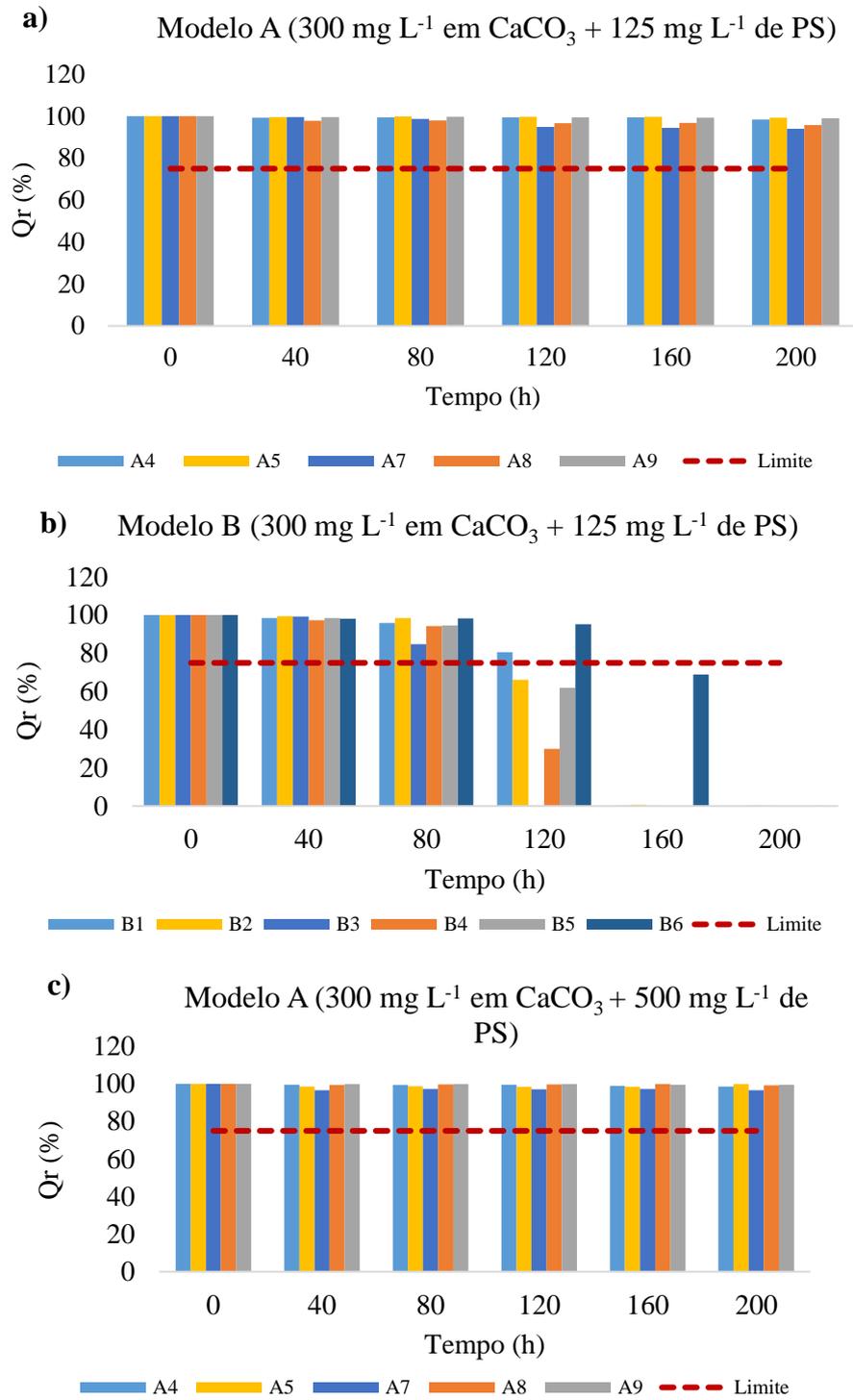
demonstrando elevada sensibilidade na vazão devido a incrustação de  $\text{CaCO}_3$ . Por outro lado, os gotejadores do modelo A mostraram-se resistentes à variação de vazão, não atingindo o limiar de  $Q_r$  que caracteriza a obstrução, independente da concentração de PS na água. O aumento na concentração de PS na água para  $500 \text{ mg L}^{-1}$  mostrou-se benéfico na redução da deposição de  $\text{CaCO}_3$  nos labirintos e, conseqüentemente, os gotejadores que haviam sido obstruídos nos ensaios anteriores, permaneceram operando, no final das 200 h de ensaio, apresentando  $Q_r$  acima do limiar crítico que caracteriza a obstrução (Figura 27d).

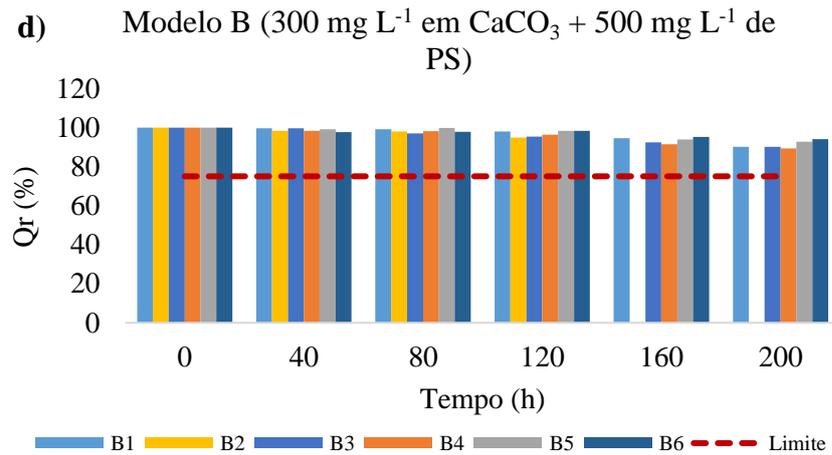




**Figura 27.** Vazão relativa dos gotejadores operados com água com dureza de 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> e diferentes concentrações de PS.

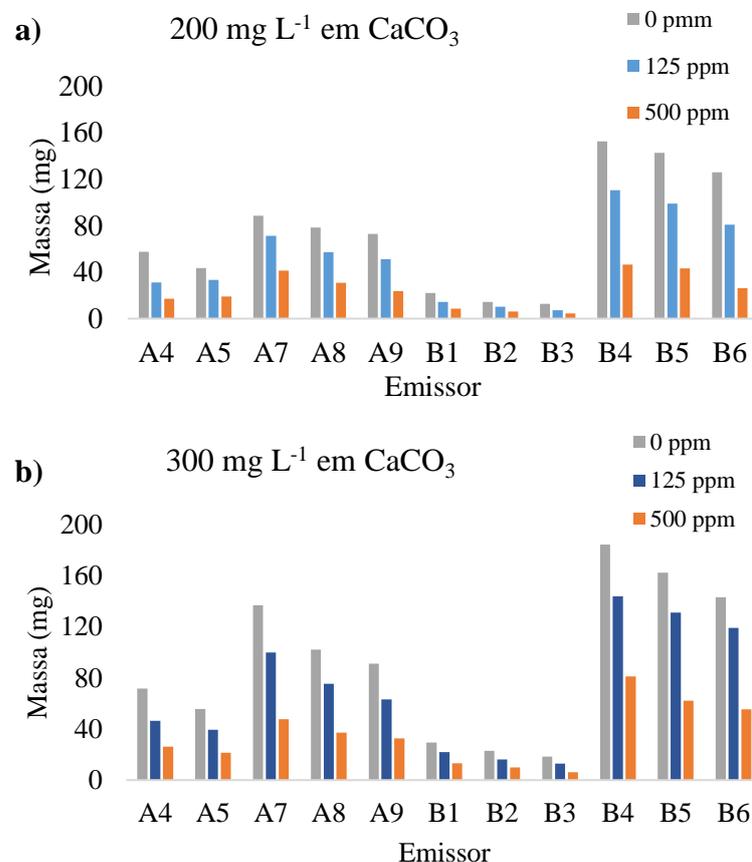
Na Figura 28 são mostrados os resultados de Q<sub>r</sub> nos ensaios efetuados com água com dureza de 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>. Nessa condição, pôde-se observar maior impacto da deposição de CaCO<sub>3</sub> na Q<sub>r</sub> dos gotejadores, entretanto, de modo similar aos ensaios com água com dureza de 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>, os gotejadores do modelo A mantiveram a Q<sub>r</sub> acima de 90% em todos os ensaios realizados com adição de PS (Figura 28a e 28c). Por outro lado, os gotejadores do modelo B apresentaram elevada sensibilidade na Q<sub>r</sub> com 125 mg L<sup>-1</sup> de PS, atingindo o limiar crítico de Q<sub>r</sub> < 75% (Figura 28b) mais rápido do que na condição com água de 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> (Figura 27b). Aumentando-se a concentração de PS na água de 125 mg L<sup>-1</sup> para 500 mg L<sup>-1</sup>, a deposição de CaCO<sub>3</sub> nos labirintos foi reduzida de modo considerável, sendo essa redução suficiente para manter a Q<sub>r</sub> dos gotejadores acima de 90% no final das 200 h de ensaio (Figura 28d).





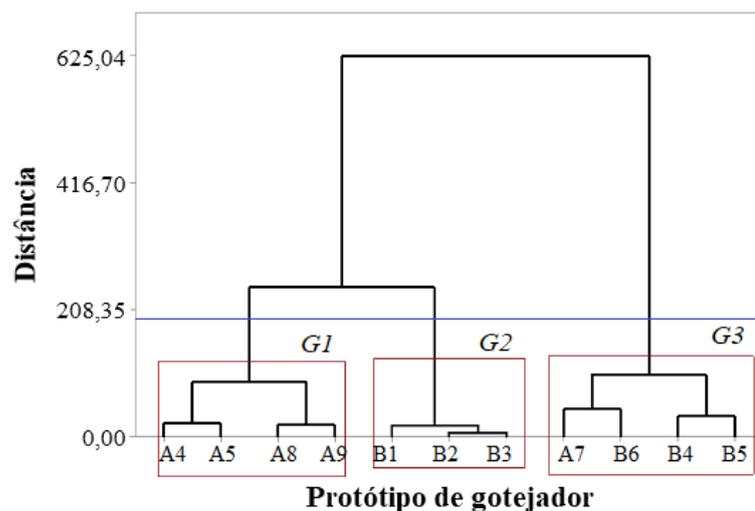
**Figura 28.** Vazão relativa dos gotejadores operados com água com dureza de 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> e diferentes concentrações de PS.

No final de cada tratamento, os protótipos de gotejadores foram retirados do suporte cuidadosamente e mantidos em dessecador até a secagem completa. Em seguida, os mesmos foram pesados em uma balança analítica para a determinação da massa de CaCO<sub>3</sub> e PS depositada no labirinto. Os resultados são mostrados na Figura 29.



**Figura 29.** Massa de CaCO<sub>3</sub> e PS depositada no labirinto dos protótipos de gotejadores nos tratamentos com água com dureza de (a) 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> e (b) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>.

Verifica-se na Figura 29 que, nas duas condições de dureza estudadas, a massa depositada seguiu uma tendência, que variou em função do protótipo de gotejador e da concentração de PS na água. A quantidade de massa depositada foi maior nos tratamentos com água cuja dureza foi de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , o que está condizente com os resultados de  $Q_r$  apresentados, que mostram maior impacto na  $Q_r$  dos protótipos quando o valor de dureza da água foi aumentado. A fim de verificar se a quantidade de massa depositada estaria relacionada com os parâmetros geométricos do labirinto, foi realizada uma análise de agrupamento dos protótipos pelo método hierárquico, interligando as amostras por suas associações, produzindo-se um dendrograma (Figura 30), onde os protótipos de gotejadores semelhantes foram agrupados entre si, de acordo com a quantidade de massa depositada no labirinto. O método de ligação de Ward e da distância Euclidiana foram utilizados para medidas de similaridade (WARD, 1963).



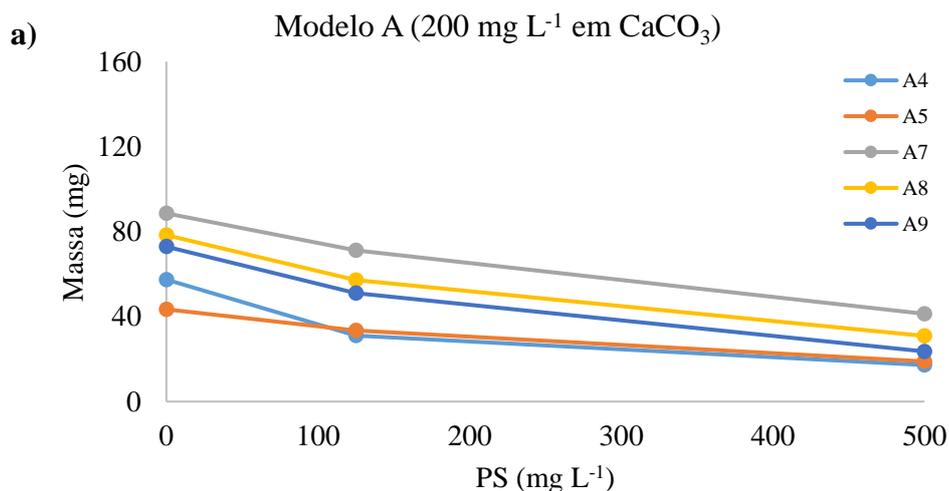
**Figura 30.** Dendrograma do agrupamento dos protótipos de gotejadores.

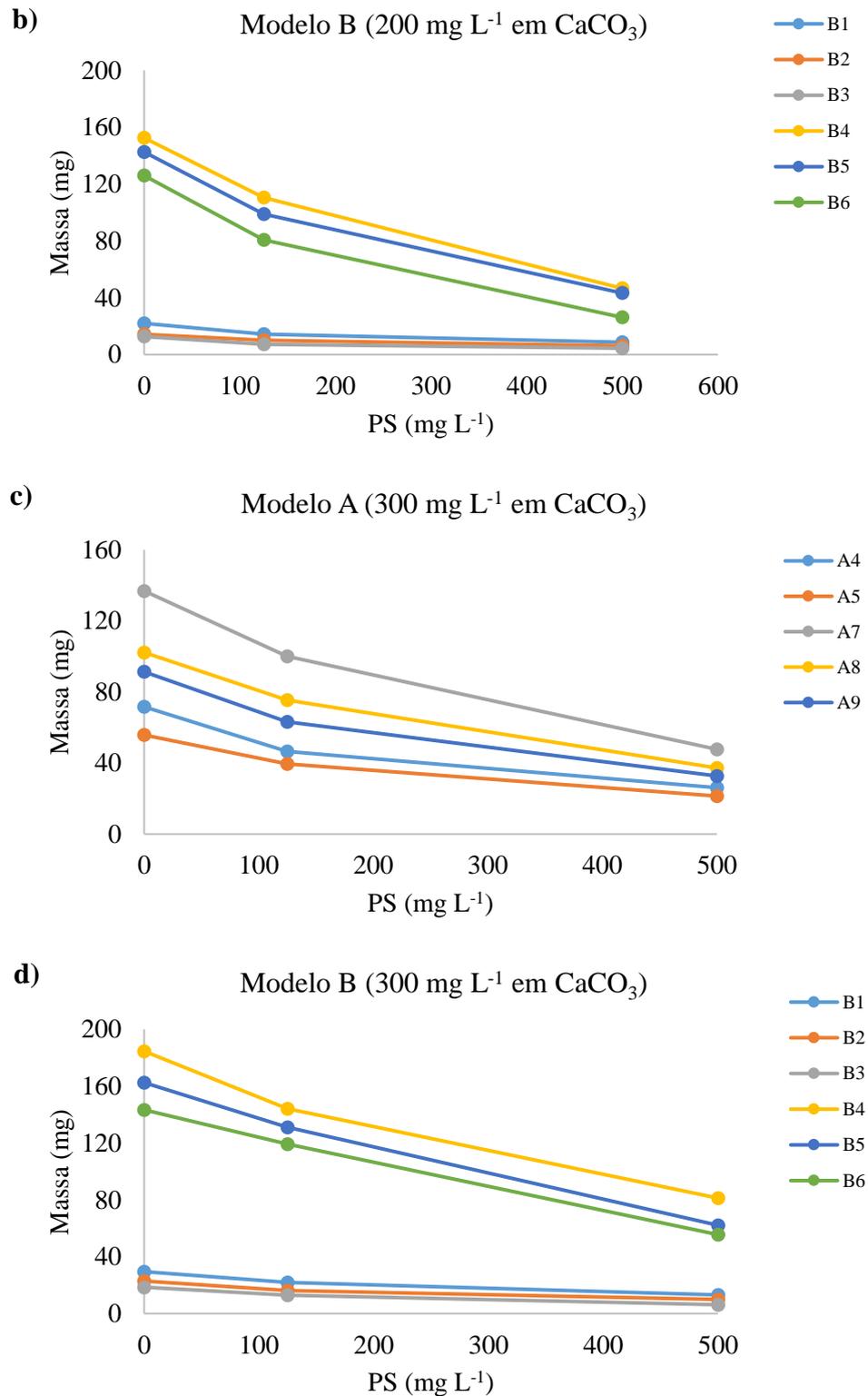
Na Figura 30, quanto menor a distância entre os pontos, maior a semelhança entre os protótipos. O critério de corte do dendrograma (linha azul) foi o de maior linha vertical cortada por, no máximo, uma linha transversal, resultando em três diferentes grupos, definidos de acordo com a distância. O grupo 1 (G1) caracteriza-se por apresentar apenas emissores do modelo A, ou seja, são emissores que apresentam menor expoente de fluxo e condições de escoamento tendendo a emissores de fluxo turbulento. O G1 pode ainda ser dividido em dois subgrupos: subgrupo 1 (SG1) e subgrupo 2 (SG2). O SG1 contempla os protótipos A4 e A5 e o SG2 contempla os protótipos A8 e A9. Os protótipos A4 e A5 possuem como características em comum mesma largura de canal (1,0 mm) e mesma área da seção de fluxo (1,0 mm<sup>2</sup>). De

modo similar, os protótipos A8 e A9 também possuem como características em comum mesma largura de canal (1,3 mm) e mesma área da seção de fluxo (1,69 mm<sup>2</sup>). Desse modo, pode-se concluir que a largura do canal e a área da seção de fluxo foram os parâmetros geométricos que influenciaram significativamente a deposição de PS e CaCO<sub>3</sub> nesses labirintos.

Por sua vez, o grupo 2 (G2) é composto por emissores do modelo B, que têm em comum mesma largura e profundidade do canal (0,5 mm), e mesma área da seção de fluxo (0,25 mm<sup>2</sup>). Já o grupo 3 (G3) é composto por protótipos do modelo B, que possuem em comum mesma largura e profundidade do canal (0,8 mm) e mesma área da seção de fluxo (0,64 mm<sup>2</sup>); e pelo modelo A7, que é um protótipo do modelo A, com características geométricas que mais se assemelham aos modelos A8 e A9, discernindo-se destes pela altura do dente e comprimento do labirinto. De modo geral, mediante os grupos formados, e analisando as características geométricas comuns em cada grupo, a largura do canal e a área da seção de fluxo foram os parâmetros geométricos que mais influenciaram os processos de deposição de CaCO<sub>3</sub> e PS nos ensaios de interação. Em consonância com os resultados obtidos neste estudo, outros trabalhos reportados na literatura também indicam a seção de fluxo e a profundidade do canal como fatores críticos e correlacionados significativamente com a deposição de precipitados químicos (LI et al., 2018, 2019a; LILI et al., 2016).

A massa de CaCO<sub>3</sub> e PS depositada em cada labirinto em função da concentração de PS na água é mostrada na Figura 31.





**Figura 31.** Massa depositada em função da concentração de PS. (a) gotejadores do modelo A nas condições C1, C2 e C3; (b) gotejadores do modelo B nas condições C1, C2 e C3; (c) gotejadores modelo A nas condições C4, C5 e C6 (d) gotejadores do modelo B nas condições C4, C5 e C6.

Na Figura 31, pode-se observar que, à medida que PS foram adicionadas na água, a quantidade de massa depositada num mesmo protótipo de gotejador foi diminuindo. Esse comportamento foi observado em todos os protótipos e em todas as condições estudadas. Em relação aos protótipos do modelo B, observa-se que os modelos B4, B5 e B6 apresentaram comportamento semelhante aos gotejadores do modelo A, assim, quando  $125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS foram adicionadas na água, houve uma queda mais abrupta na quantidade de massa depositada; com a adição de  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS, essa queda foi mais acentuada. Já os modelos B1, B2 e B3 apresentaram variação de massa depositada mais acentuada em todas as mudanças de concentração de PS, o que pode estar intimamente relacionado às características de escoamento nos labirintos desses gotejadores, como será discutido posteriormente. Os modelos A4 e A5 foram os que apresentaram menor quantidade de massa em seus labirintos e não obstruíram em nenhuma das condições testadas, destacando-se dos demais. Desse modo, pode-se supor que esses emissores apresentam elevada capacidade de transporte de sedimentos.

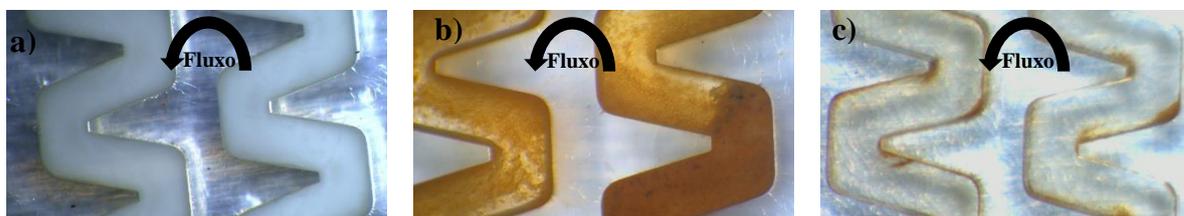
Lili et al. (2020) observaram que a obstrução de gotejadores por depósitos de  $\text{CaCO}_3$  pode ocorrer de três modos: o primeiro seria a redução gradativa da vazão devido à precipitação de carbonatos de cálcio e de magnésio, que fluem para os gotejadores e, se fixam nas paredes, assim, as cargas superficiais e as forças moleculares fazem com que outros precipitados se colidam e se agreguem, formando constituintes floculantes que se fixam na parede interna desses emissores. Esses processos fazem com que a área da seção de fluxo dos gotejadores se torne menor ao longo do tempo, reduzindo o caminho do fluxo e resultando em uma redução gradual na capacidade de descarga dos gotejadores. O segundo seria a redução devido às flutuações de vazão, uma vez que os materiais de obstrução, continuamente presos à parede interna dos emissores, se dissolvem, corroem e descamam sob o efeito da tensão de cisalhamento do fluxo. Essas mudanças flutuantes na vazão poderiam induzir a obstrução do gotejador. O terceiro método seria a redução repentina da vazão, que ocorre em condições de alta supersaturação, nesse caso, vários precipitados químicos podem surgir formando agregados maiores, que rapidamente se depositam na parede interna do emissor reduzindo a passagem de água (LILI et al., 2020). Dos diferentes modos de obstrução observados pelos autores supracitados, foram observados, neste estudo, que a obstrução ocorreu devido à redução gradativa da vazão e à redução repentina. As flutuações nos valores de  $Q_r$  observadas não foram suficientes para classificar os gotejadores como obstruídos, além de terem sido observadas principalmente nos gotejadores do modelo A, que apresentam características de escoamento bastante diversificadas em um mesmo defletor (LAVANHOLI et al., 2020). A baixa susceptibilidade à obstrução dos gotejadores do modelo A pode ser explicada devido às

características do regime de escoamento que se forma no labirinto desses gotejadores, isto é, alta velocidade de fluxo e maior turbulência e, conseqüentemente, maior tensão de cisalhamento.

#### 4.3.2 Padrões de deposição

As imagens do interior dos labirintos revelaram que a deposição de  $\text{CaCO}_3$  e PS nos labirintos ocorreu de modo gradual ao longo dos dias de ensaio, embora tenham sido observadas quedas abruptas nos valores de  $Q_r$ . As quedas abruptas observadas podem estar relacionadas ao intervalo de medição da vazão, que foi de 40 h. Esse período pode ter sido suficiente para a ocorrência da deposição e crescimento de cristais de forma que permitisse a interrupção completa do fluxo de água no labirinto, dado que as condições de escoamento nos labirintos dos gotejadores que obstruíram favoreciam os processos de aglomeração de cristais, além desses canais possuírem pequena área de seção de fluxo.

Na Figura 32 são mostrados os depósitos que ocorreram no labirinto do protótipo modelo B6 no tratamento apenas com água calcária com dureza de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  (Figura 32a), no tratamento com água com dureza de  $300 \text{ mg L}^{-1} + 125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS (Figura 32b) e no tratamento com água com dureza de  $300 \text{ mg L}^{-1} + 500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS (Figura 32c). Pode-se observar que no tratamento sem adição de PS os depósitos de  $\text{CaCO}_3$  foram mais acentuados e ocorreram de maneira uniforme ao longo de todo o labirinto. Com a adição de  $125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS os depósitos ocorreram com maior magnitude apenas nos primeiros defletores (Figura 32b). Aumentando-se a concentração de PS para  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , a deposição foi mínima e ocorreu somente em zonas de quina, permanecendo praticamente limpo todo labirinto (Figura 32c).

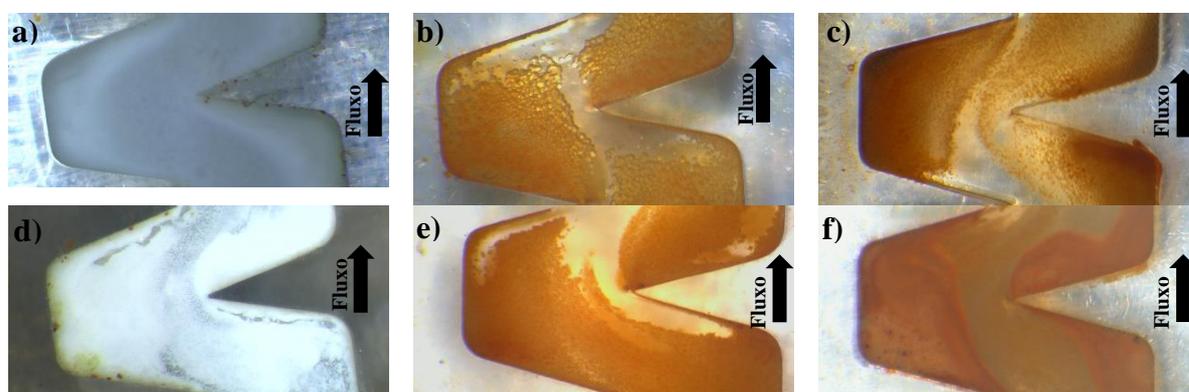


**Figura 32.** Locais de deposição de  $\text{CaCO}_3$  e PS no modelo B6. (a) água com  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , (b) água com  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS, (c) água com  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS.

Os padrões de deposição nos protótipos do modelo A ocorreram de modo semelhante, e são aqui representados pelo modelo A9 (Figura 33). O modelo A9 faz parte do

grupo de protótipos com maior área de seção de fluxo ( $1,69 \text{ mm}^2$ ) e é o modelo que apresenta a maior relação  $H/W = 1,6$ , portanto, possui vórtices bem desenvolvidos (Figura 22d). As imagens apresentadas referem-se ao primeiro defletor, o qual foi o mais atingido pela deposição, os demais defletores permaneceram praticamente limpos até o final dos ensaios.

Aparentemente, a deposição de  $\text{CaCO}_3$  e PS foi altamente dependente da velocidade de escoamento no canal. Nos defletores onde houve deposição, as zonas de alta velocidade permaneceram limpas, constatando-se que o fluxo nesses defletores ocorreu nessas zonas, mantendo a  $Q_r$  desses gotejadores acima de 90% até o final dos ensaios, mesmo ocorrendo deposição em grande parte da seção do defletor.



**Figura 33.** Locais de deposição de  $\text{CaCO}_3$  e PS no modelo A9. (a) água com  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , (b) água com  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  +  $125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS, (c) água com  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  +  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS, (d) água com  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , (e) água com  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  +  $125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS, (f) água com  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  +  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS.

Os padrões de deposição de  $\text{CaCO}_3$  e PS observados nos protótipos do modelo A podem ser explicados por duas razões, e ambas estão relacionadas ao perfil de escoamento no defletor. A primeira baseia-se no fato de que os protótipos do modelo A possuem seção de fluxo grande o suficiente para que se formem três zonas de escoamento com características distintas no labirinto: zona de vórtices, zona de estagnação e zona de escoamento principal (ZHANG et al., 2010), sendo que as duas primeiras apresentam locais suscetíveis à deposição. A primeira zona é caracterizada por apresentar regiões de recirculação, formadas por fluxos individuais distribuídos em ambos os lados da área de fluxo principal, apresenta uma região central de baixa velocidade de escoamento e outra periférica, com velocidades de escoamento relativamente elevadas (AL-MUHAMMAD et al., 2018; WEI et al., 2006; YU et al., 2018). Nas zonas de vórtices, os cristais de  $\text{CaCO}_3$  já formados são altamente suscetíveis à deposição, se entrarem

na região central, ou ainda, podem permanecer em recirculação nas zonas periféricas até que as forças moleculares e de adesão atuem, fixando o cristal na superfície da parede do labirinto. Já na zona de estagnação, o cristal automaticamente se sedimenta devido às forças gravitacionais e favorecem a adesão de outros cristais (ALAHMAD, 2004). Na zona de escoamento principal, que ocorre na região central do labirinto, a velocidade de escoamento é alta o suficiente para não haver a deposição dos cristais.

A segunda razão que pode explicar a baixa deposição na zona de escoamento principal está relacionada à tensão de cisalhamento proporcionada nessa região devido à elevada velocidade de fluxo. As características geométricas dos protótipos do modelo A proporcionam fluxo turbulento devido ao baixo expoente de vazão desses emissores ( $x < 0,489$ ) associado a vórtices bem desenvolvidos devido ao aumento da relação H/W (LAVANHOLI et al., 2020; YU et al., 2018). De acordo com Zhangzhong et al. (2019), a taxa de sedimentação do precipitado químico é proporcional à velocidade média da seção do caminho do fluxo, que é proporcional às forças de cisalhamento. E, as forças de cisalhamento nas interfaces material-fluido são responsáveis pela remoção da incrustação, sendo a taxa de remoção proporcional à tensão de cisalhamento e inversamente proporcional à espessura da incrustação. A taxa de remoção é afetada direta ou indiretamente por vários parâmetros, como tensão do fluxo nas paredes, resistência ao cisalhamento da camada de incrustação, e densidade da camada de incrustação (ALSADAIE; MUJTABA, 2019). A tensão de cisalhamento mínima para remover incrustações da superfície é denominada tensão de cisalhamento crítica e depende das forças de adesão entre o depósito e a superfície e da morfologia do depósito (ROYER et al., 2010).

A tensão de cisalhamento poderia atuar através de dois diferentes mecanismos que explicam a remoção dos cristais já depositados: *sliding detachment mechanism and a rolling detachment mechanism* (AHMADI; GUO; ZHANG, 2007; CHANG; HAMMER, 1996). As forças que atuam sobre uma partícula de diâmetro  $d_p$  depositada em uma superfície com rugosidade  $\varepsilon$  incluem: a força de arrasto ( $F_D$ ), a força de sustentação ( $F_S$ ), a resistência ao atrito da interface partícula-substrato ( $F_R$ ), e a força de adesão ( $F_A$ ). Uma partícula é removida por deslizamento quando  $F_D > F_R$ . Já o desprendimento por rolagem ocorre quando o momento externo ( $M_d$ ) sobre o ponto de contato da partícula a jusante supera o momento de resistência devido à força de adesão ( $M_d + F_S + F_S \geq F_A$ ) (AHMADI; GUO; ZHANG, 2007; ROYER et al., 2010). A rolagem é o mecanismo preferido para a remoção de partículas esféricas de  $\text{CaCO}_3$  (AHMADI; GUO; ZHANG, 2007; SOLTANI; AHMADI, 1994; TAHERI; BRAGG, 1992). Assim, a tensão de cisalhamento na região de fluxo principal seria responsável por retardar ou limitar o aumento na espessura de incrustação, além de remover cristais já depositados.

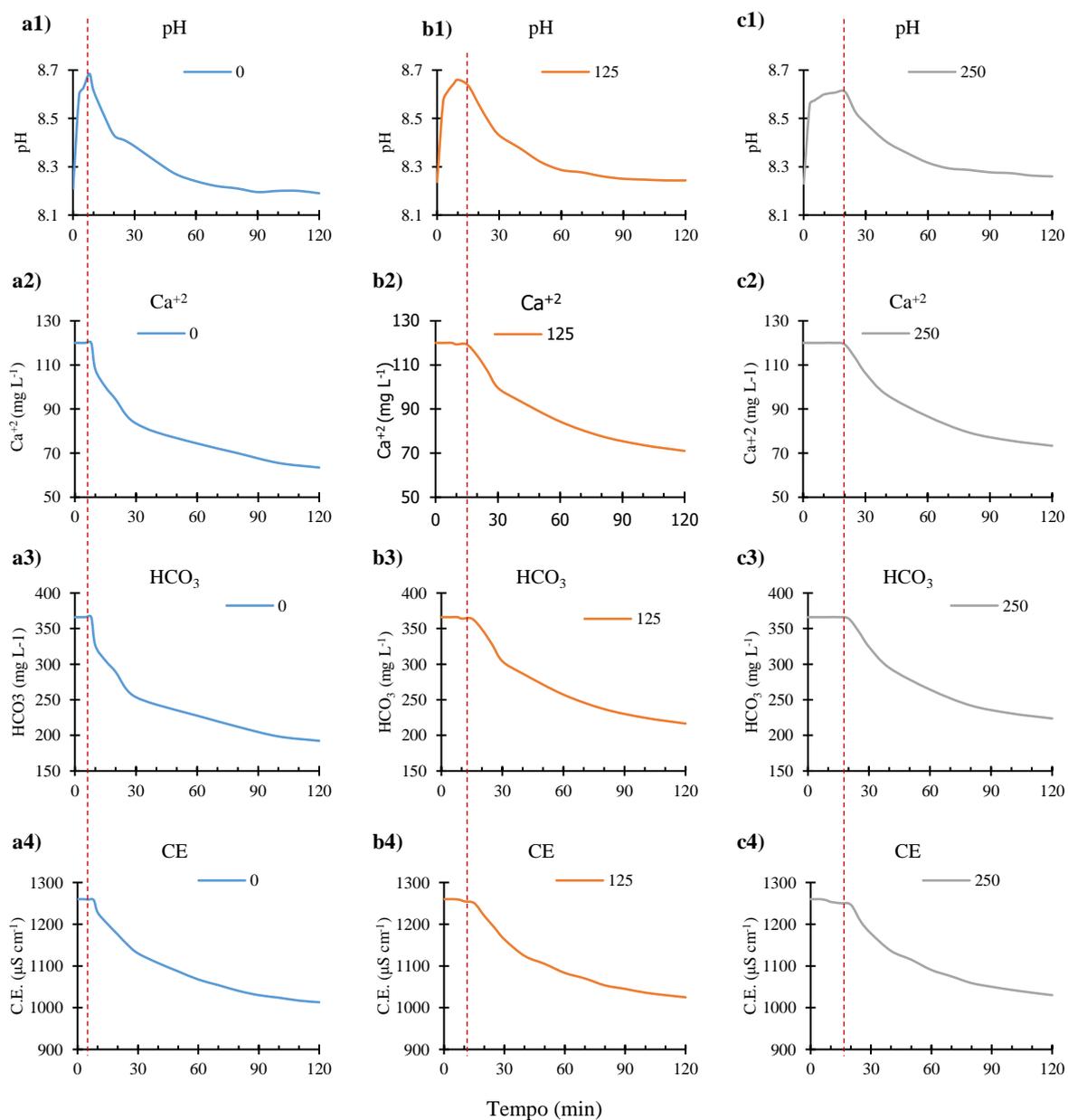
Não houve diferença nos padrões de deposição quando a dureza da água foi aumentada de 200 para 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>, apenas na intensidade de massa depositada, conforme mostrado na Figura 33. Diferente do observado nesse estudo, Zhangzhong et al. (2019) observaram que os locais de formação de incrustação química nos gotejadores operados com água salina apresentaram relação direta com a condutividade elétrica da água, sendo que, para águas com CE < 2,0 dS m<sup>-1</sup>, a incrustação ocorreu na região do ângulo do dente reduzindo o caminho de fluxo gradualmente até a completa obstrução do emissor. Já em águas com CE de 4,0 e 6,0 dS m<sup>-1</sup> a incrustação química cobriu quase que totalmente o caminho do fluxo, levando ao entupimento completo do gotejador.

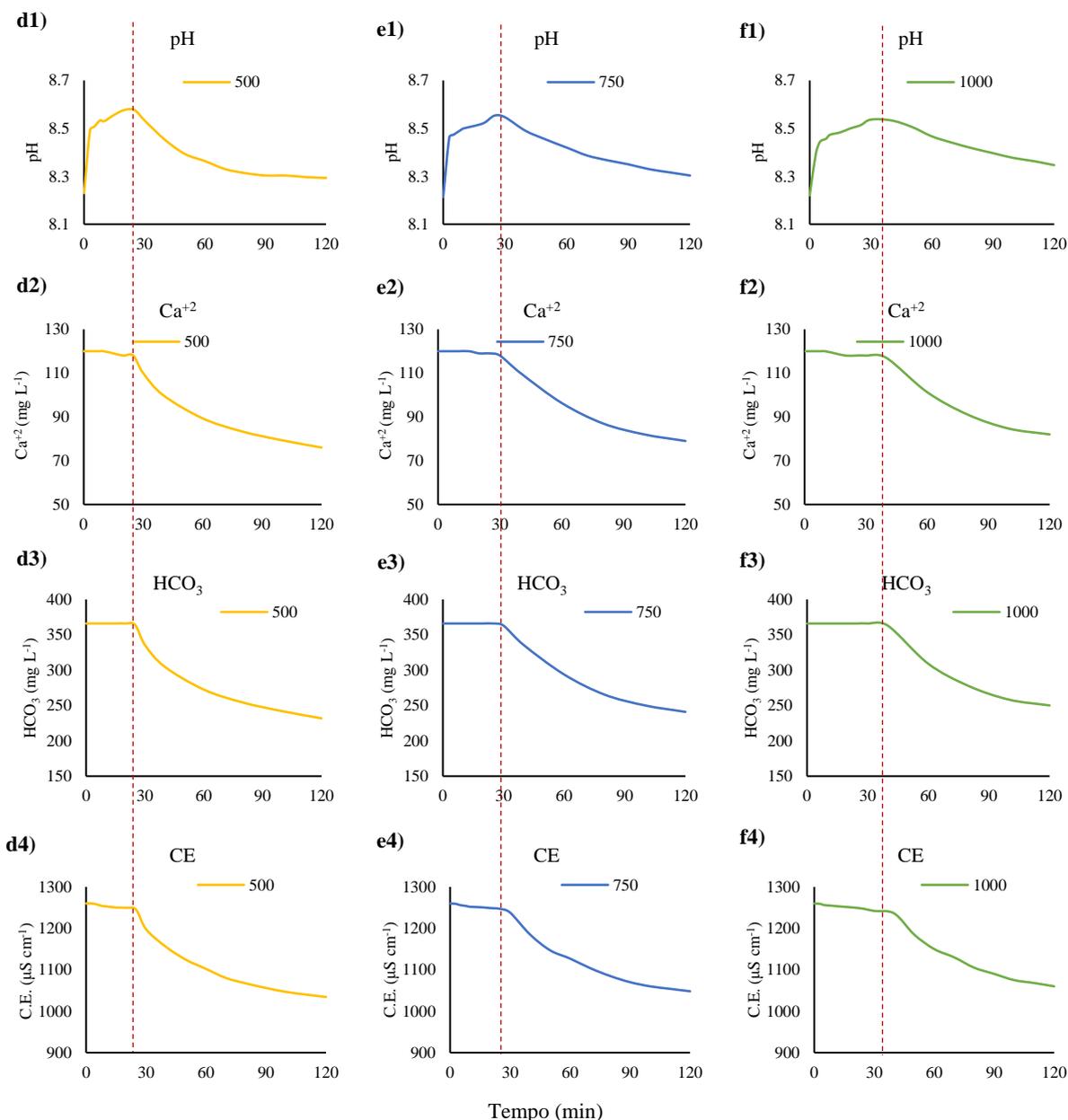
### 4.3.3 Mecanismos de interação

A fim de esclarecer e compreender a influência de PS na precipitação e deposição de CaCO<sub>3</sub> nos labirintos dos gotejadores, foram realizados testes em béquer fixando o valor de dureza da água em 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> e variando a concentração de PS na água. Foram estudadas as seguintes concentrações de PS: 0, 125, 250, 500, 750 e 1000 mg L<sup>-1</sup>. Um agitador magnético com controle de rotação e temperatura foi utilizado. A temperatura da água foi mantida em 25 ± 1 °C e a rotação aplicada foi de 1500 rpm (REIS et al., 2018). O pH e a CE da solução foram monitorados continuamente (Figura 34). As concentrações de cálcio e de bicarbonato foram determinadas por titulação em intervalos regulares (Figura 34). Os efeitos cinéticos foram analisados considerando o período de indução e as taxas de mudança na concentração (SHEIKHOLESLAMI; ONG, 2003). Na Figura 34, a barra vertical vermelha tracejada indica o momento em que foi observado mudanças bruscas nas variáveis monitoradas, indicando o início da precipitação. Nota-se que, para uma determinada concentração de PS na água, as mudanças bruscas foram observadas em um mesmo momento em todas as variáveis, confirmando a exatidão dos resultados.

A curva experimental de pH versus tempo (Figura 35) obtida a partir de um experimento de precipitação volumétrica é bastante útil e tem sido utilizada em diversos estudos (MENZRI; GHIZELLAOUI; TLILI, 2017b; REIS et al., 2018; SOUSA; SIGNORELLI; BERTRAN, 2016), pois fornece informações relevantes que descrevem o comportamento do sistema em função das condições aplicadas. Informações como pH crítico (*pH<sub>c</sub>*), tempo crítico (*t<sub>c</sub>*), pH de saturação (*pH<sub>s</sub>*), tempo de saturação (*t<sub>s</sub>*), tempo de duração das fases de supersaturação, nucleação e de crescimento podem ser facilmente obtidas a partir dessas curvas (Figura 34a). Na Figura 34b são mostradas as curvas de pH versus tempo em função da

concentração de PS adicionadas na água. Cada curva representa a média de três experimentos com boa reprodutibilidade.

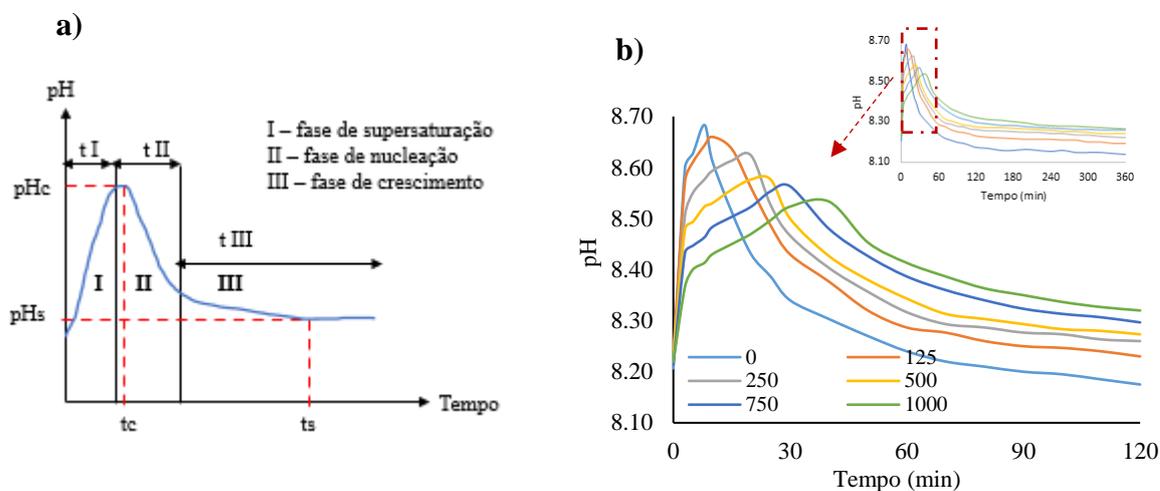




**Figura 34.** Variação do pH, e taxas de decaimento das concentrações de cálcio e de bicarbonato e da condutividade elétrica (CE) da água nos ensaios em béquer.

O valor máximo de pH, equivalente à quantidade de grau de supersaturação necessária para que ocorra a precipitação do  $\text{CaCO}_3$  é conhecido como pH crítico ( $pH_c$ ), e o valor de pH no qual o sistema entra em equilíbrio e, finalmente, se estabiliza é chamado de pH de saturação ( $pH_s$ ) (SOUSA; SIGNORELLI; BERTRAN, 2016). Os tempos em que  $pH_c$  e  $pH_s$  ocorrem são chamados, respectivamente, de: tempo crítico ( $t_c$ ), isto é, o tempo necessário para que se forme os primeiros núcleos; e, tempo de saturação ( $t_s$ ), que é o tempo necessário para que o sistema entre em equilíbrio. Além disso, na Figura 35a, pode-se observar que o processo

de formação do cristal pode ser dividido em três diferentes fases, chamadas de fase de supersaturação, fase de nucleação e fase de crescimento (REIS et al., 2018).



**Figura 35.** Curva experimental de pH versus tempo para cada concentração de PS estudada. (a) Parâmetros da curva; (b) Resultados experimentais.

A Tabela 10 resume os principais parâmetros obtidos a partir das curvas de pH versus tempo em função da concentração de PS na água.

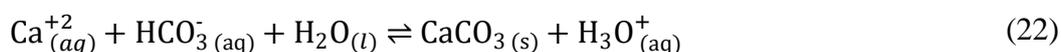
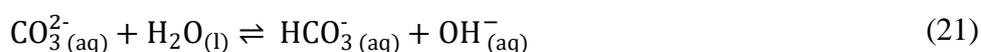
**Tabela 10.** Parâmetros obtidos a partir da curva de pH versus tempo em função da concentração de PS na água.

PS (mg L <sup>-1</sup> )	t <sub>I</sub> (min)	t <sub>II</sub> (min)	Tc (min)	pH <sub>c</sub> (min)	Ts (min)	pH <sub>s</sub>
0	5,0	2,0	8,0	8,68	160,0	8,16
125	10,0	5,0	10,0	8,66	140,0	8,22
250	15,0	7,0	15,0	8,62	140,0	8,25
500	20,0	10,0	20,0	8,58	120,0	8,27
750	25,0	15,0	30,0	8,56	120,0	8,29
1000	30,0	18,0	40,0	8,53	110,0	8,32

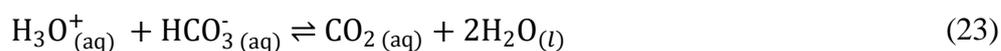
A precipitação de sais pode ser explicada pelos modelos de nucleação e crescimento. Do ponto de vista termodinâmico, a formação de uma nova fase só ocorre se a energia livre do sistema variar de forma negativa. Segundo a teoria clássica da nucleação a variação da energia livre de formação de uma nova fase depende do somatório de um termo volumétrico com um termo superficial (MULLIN, 2001). O termo volumétrico é positivo abaixo da saturação, nulo no ponto de saturação e negativo quando há supersaturação do sistema. O termo superficial é sempre positivo pois depende apenas da área da superfície e da tensão entre as interfaces dos sistemas, que são sempre positivos.

Assim, abaixo da saturação e no ponto de saturação, a variação da energia livre é sempre positiva e a precipitação não ocorre. Acima do ponto de saturação, ou seja, no regime de supersaturação, a precipitação só vai ocorrer quando a contribuição volumétrica, que é negativa, for mais significativa que a contribuição superficial, levando o sistema a uma variação negativa de energia (MULLIN, 2001). Clusters de íons muito pequenos tem razão área/volume grande, e levam a um aumento da energia do sistema, portanto são ressolubilizados no meio ao invés de crescerem. A partir de um tamanho crítico, a diminuição da razão área/volume faz com que o crescimento de clusters formados leve a uma diminuição da energia do sistema. Clusters formados acima do tamanho crítico são chamados de núcleos, e a nucleação se refere ao seu aparecimento na solução. Quanto maior o grau de supersaturação, maior a chance de cluster acima do tamanho crítico sejam formados (BANSAL; CHEN; MÜLLER-STEINHAGEN, 2008; KUBOTA; MULLIN, 1995).

A nucleação e o crescimento de  $\text{CaCO}_3$  pode ser determinada acompanhando a variação de pH do sistema. A adição de íons carbonato em meio aquoso promove a liberação de  $\text{OH}^-$ , aumentando o pH do meio (Eq. 21). Caso a concentração de íons na solução seja suficiente, é atingido o limite de supersaturação, no qual a nucleação tem início, e é evidenciado pelo  $pH_c$ . O tempo até o início da nucleação é chamado de tempo de indução. A formação de  $\text{CaCO}_3$  precipitado libera íons  $\text{H}_3\text{O}^+$ , diminuindo abruptamente o pH do meio (Eq. 22). Os núcleos formados crescem retirando íons solubilizados no meio. A retirada de íons carbonato desloca o equilíbrio visto na equação (21) para a formação dos reagentes, contribuindo para diminuir o pH do meio, até que não haja mais acúmulo de solutos acima da saturação e o sistema entra em equilíbrio, sem mais variação de pH (MENZRI; GHIZELLAOUI; TLILI, 2017a; REIS et al., 2017; SOUSA; SIGNORELLI; BERTRAN, 2016; VAN DER BRUGGEN et al., 2009).



No experimento específico, realizado em béquer, foi utilizada a técnica de degaseificação, que, sob agitação, remove parte do gás carbônico solúvel na água. A sua remoção promove o deslocamento da equação (23) para a formação dos produtos, consumindo íons  $\text{H}_3\text{O}^+$  e carbonato do meio. A remoção de  $\text{CO}_2$  do meio também contribui para o aumento do pH, que, nesse caso, é intensificada pela remoção de  $\text{H}_3\text{O}^+$ .



A adição de PS na água interferiu fortemente nos parâmetros de nucleação e precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , sendo que, à medida que a concentração de PS foi aumentada, houve aumento da duração da fase de supersaturação. Pode-se observar que o tempo necessário para a formação dos primeiros núcleos ( $t_c$ ) aumentou de 8 min, na ausência de PS, para 40 min, na presença de  $1000 \text{ mg L}^{-1}$  de PS. Esse resultado evidencia que as PS poderiam atuar retardando o tempo de indução para que a nucleação tivesse início. Isso porque, as PS vindas de solo natural e sem tratamento químico, poderiam apresentar resquícios de compostos solúveis, que em solução, podem atuar inibindo a nucleação. A comprovação dessa suposição poderá ser feita através da medição da tensão superficial da água antes e após a adição de PS.

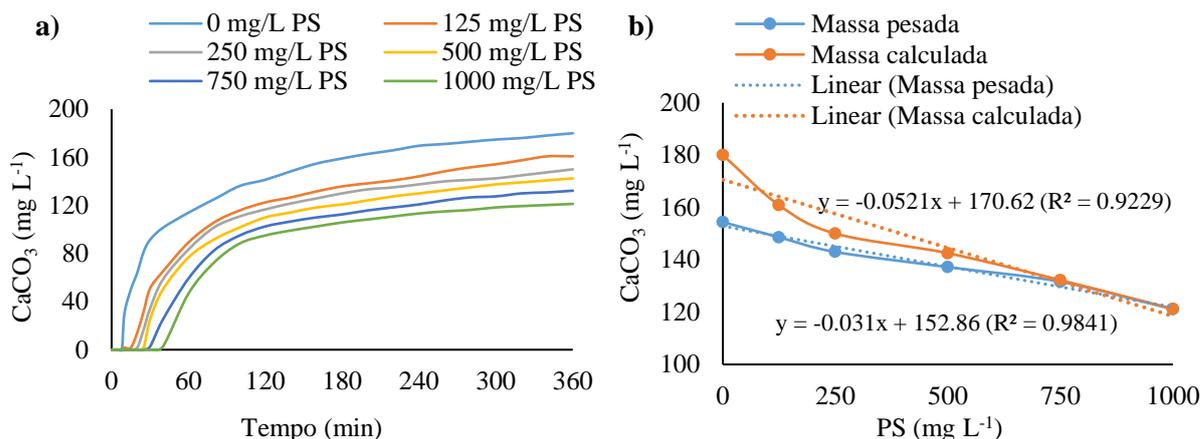
No entanto, apesar do aumento no tempo de indução, houve uma tendência de diminuição do valor de  $pH_c$  à medida que a concentração de PS na água aumentou. Isso significa que o grau de supersaturação necessário para que a nucleação ocorra diminui com o aumento da concentração de PS. Esse resultado é indicativo de que o tamanho crítico dos núcleos formados diminui na presença de PS. A nucleação pode ser homogênea, quando ocorre na solução, ou heterogênea, quando ocorre em uma superfície. A nucleação heterogênea é mais favorável energeticamente, ocorrendo em tamanhos críticos menores que a homogênea, e por isso ocorre preferencialmente. No experimento realizado em béquer, sem as PS, além do precipitado suspenso na solução, foi observada uma camada branca depositada na superfície de vidro do béquer, indicando que ocorreu a nucleação heterogênea. Já quando as PS estão em solução, essa camada de precipitado no vidro não é mais visível, indicando que a nucleação heterogênea ocorreu na superfície das PS. Provavelmente a energia livre do sistema é menor com a nucleação sobre as PS do que sobre o vidro, induzindo a nucleação heterogênea sobre as partículas (AZIMI et al., 2014; CHEONG; GASKELL; NEVILLE, 2013; SIGNORELLI; SOUSA; BERTRAN, 2019; SOUSA et al., 2017; TESLER et al., 2015).

Além disso, nota-se que o tempo necessário para que o sistema entrasse em condição de equilíbrio ( $t_s$ ) foi atingido mais rapidamente nas condições com maior concentração de PS na água. Isso pode ser um efeito cinético, em que a velocidade de precipitação do  $\text{CaCO}_3$  diminui, ou pode ser um efeito termodinâmico, em que a quantidade de  $\text{CaCO}_3$  precipitado no sistema diminui. Essa última hipótese é suportada pelo fato de que quando a concentração de PS na água foi aumentada, o valor de  $pH_s$  aumentou, indicando que, nessas circunstâncias, a quantidade de  $\text{CaCO}_3$  formado é fortemente influenciada pela concentração de PS presente na água. Quanto maior o valor de  $pH_s$ , maior é a solubilidade de  $\text{CaCO}_3$  no meio. Assim, a presença de PS diminui a quantidade total de precipitados, atuando como inibidor.

Em conformidade com os resultados aqui relatados, Deslouis et al. (2006) observaram que partículas de argila influenciaram significativamente a deposição de  $\text{CaCO}_3$  em água do mar, e o efeito mais marcante foi proporcionado pelas partículas de montmorilonita (argilomineral 2:1, portanto, mais reativa que a caulinita (1:1), que também foi testada), que atrasaram significativamente o início da deposição calcária. Ainda de acordo com os autores supracitados, uma vez que a deposição começa, a cinética de deposição permanece inalterada em relação à situação sem partículas de argila. Além disso, o tempo de duração do período de retardo é aproximadamente proporcional à concentração de sedimento na solução. Os autores ainda sugerem que o atraso ocorre devido a dupla camada elétrica que atrapalha a nucleação na parede das argilas. Embora Deslois et al. (2006) não tenha observado mudanças na cinética de deposição depois do início da precipitação, neste experimento, notou-se mudanças nas curvas cinéticas (Figura 36) proporcionadas pela adição de PS, o que também ficou evidente nos valores de *pHs*. Essa observação também sugere que há resquícios de material adsorvido no solo que podem ir para a solução alterando a cinética de precipitação.

O efeito anti-incrustante na precipitação de  $\text{CaCO}_3$  por partículas na água é relatada na literatura em outros estudos (RAMACHANDRULA; KASA, 2020; YI-PIN LIN; PHILIP C. SINGER; AIKEN§, 2005). Os resultados do estudo de Ramachandrupula and Kasa (2020), por exemplo, indicam elevada probabilidade de material de entupimento físico diminuir a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  em labirinto de gotejadores.

Trabalhos reportados na literatura descrevem a taxa de formação de  $\text{CaCO}_3$  de acordo com o decaimento das concentrações de  $\text{HCO}_3^-$ , (KAROUI et al., 2010; MENZRI; GHIZELLAOUI; TLILI, 2017b) ou de  $\text{Ca}^{+2}$  (BELATTAR et al., 2021; QIAN et al., 2019; SHEIKHOLESLAMI; ONG, 2003). Neste estudo, a fim de avaliar possíveis interação dos íons em solução com as PS, foi determinada a taxa de consumo de ambos, e assim, evitar resultados equivocados para cálculo da massa de  $\text{CaCO}_3$  precipitada em cada condição. As curvas cinéticas de precipitação em função da concentração de PS na água são mostradas na Figura 36a. A partir da concentração residual de ambos os íons, obteve-se a massa de  $\text{CaCO}_3$  precipitado calculada (*Mc*). A massa de  $\text{CaCO}_3$  precipitado pesada (*Mp*) foi obtida no final dos ensaios, após filtração da solução em membrana filtrante nitrato de celulose 0,45  $\mu\text{m}$ , secagem em estufa e pesagem em balança analítica. A *Mp* foi obtida subtraindo-se a massa de PS, adicionada em cada condição, da massa total pesada. Os resultados de *Mp* e *Mc* são apresentados na Figura 36b.



**Figura 36.** (a) Taxa de formação de CaCO<sub>3</sub> em água calcária com diferentes concentrações de PS. (b) Massa de CaCO<sub>3</sub> precipitado calculada e pesada obtida no final dos ensaios em função da concentração de PS na água.

Verifica-se na Figura 36 que a taxa de precipitação de CaCO<sub>3</sub> ocorre de forma intensa nos momentos iniciais (fases I e II). Após esse período, a precipitação continua, porém, de forma mais lenta, não se obtendo um patamar de aumento durante o período de 6h de duração do experimento. A cinética de precipitação foi diretamente afetada pela concentração de PS na água. Os resultados revelam que as PS atuam fortemente no período de indução e de nucleação dos cristais. A massa de CaCO<sub>3</sub> precipitado foi inversamente proporcional à concentração de PS na água. Esses resultados estão em conformidade com os resultados observados nos labirintos dos gotejadores. Embora as condições de escoamento nos labirintos sejam distintas das condições de béquer, os resultados indicam que os testes em béquer são representativos dos fenômenos que acontecem nos labirintos em termos de interação entre PS, solução e cristais de CaCO<sub>3</sub>, auxiliando na compreensão e clareamento dos mecanismos de interação.

No ensaio com ausência de PS, é notória a diferença entre  $M_c$  e  $M_p$ . Essa diferença foi bem mais acentuada nessa condição do que nos ensaios em que PS foram adicionadas. Incrementos na concentração de PS na água foi suficiente para minimizar a diferença observada. A partir de 750 mg L<sup>-1</sup> de PS, a massa pesada tornou-se igual à massa calculada. A diferença de massa observada pode ser explicada em função dos locais onde os cristais foram nucleados e aderidos. Nos ensaios com ausência de PS, notou-se que, no final dos testes, havia uma camada de incrustação de CaCO<sub>3</sub> significativa nas paredes do béquer, de baixa espessura, porém visualmente nítida. Tal observação leva à evidência de que a nucleação, na ausência de PS, além de ter ocorrido no bulk da solução, ocorreu também nas paredes do béquer. À medida que as PS foram adicionadas na água, a incrustação nas paredes deixou de existir; nesse caso,

houve uma preferência de nucleação na superfície das PS. Esses resultados foram evidenciados nas análises de DR-x.

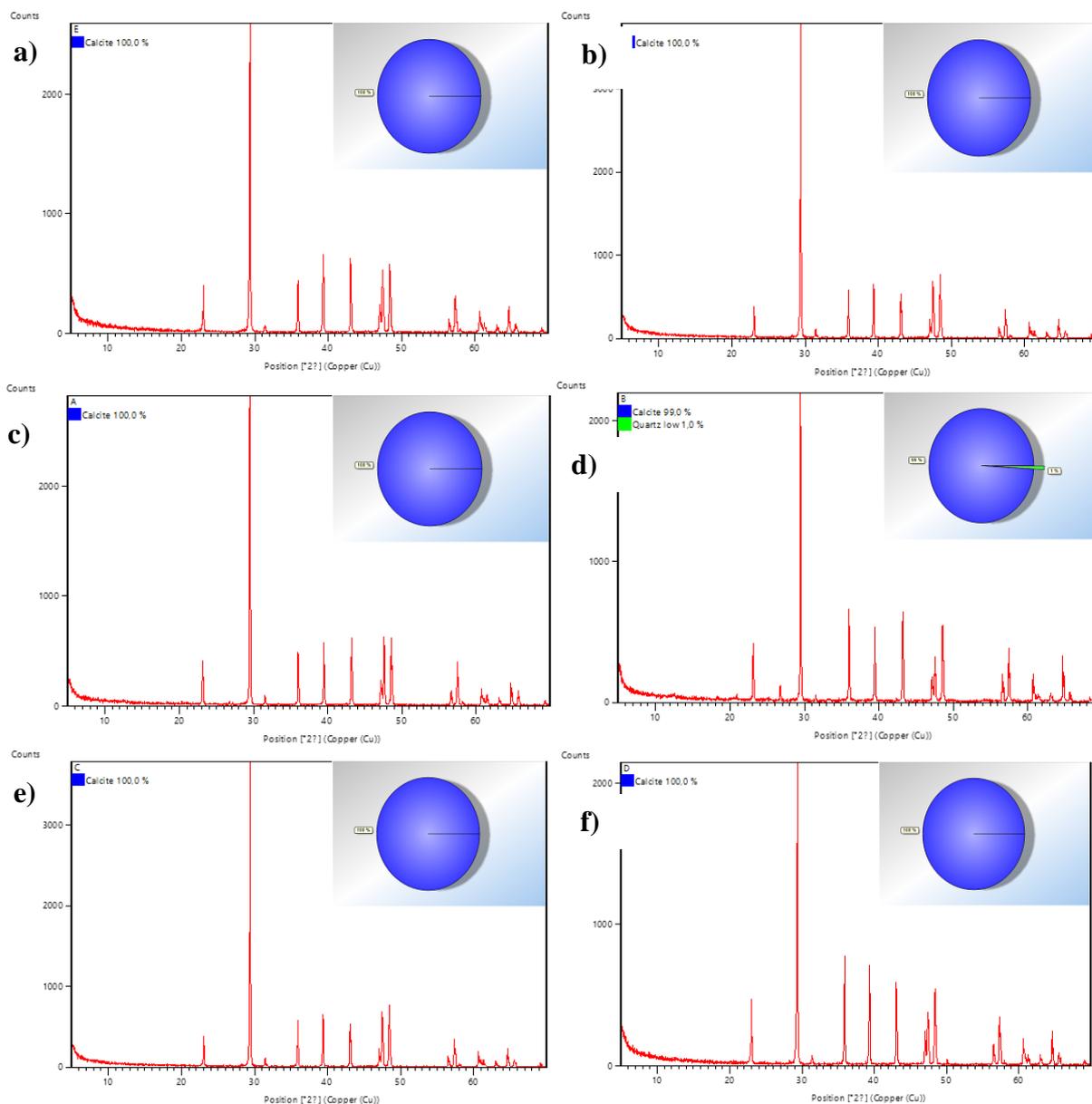
Os resultados observados nesses testes ajudam a esclarecer os resultados observados nos labirintos dos gotejadores. Na condição de ausência de PS, há uma preferência de nucleação e adesão dos clusters de  $\text{CaCO}_3$  na superfície do material do gotejador (PMMA), levando à rápida interrupção do fluxo de escoamento, devido ao aumento da espessura da camada. Quando PS foram adicionadas na água, a nucleação, de fato, ocorreu na superfície das PS; estas, por sua vez, por serem pequenas o suficiente para não se depositarem e, somado às condições de escoamento no labirinto, foram arrastadas pelo fluxo e eliminadas pelo gotejador, minimizando assim, os processos de obstrução, que não foram observados quando a água continha  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS.

Além da atuação da energia livre de superfície, a adesão de núcleos cristalinos de  $\text{CaCO}_3$  na superfície das PS não é descartada. A superfície de PS está sujeita a um conjunto de reações químicas, que compreendem fenômenos de adsorção/dessorção, precipitação e complexação (SILVEIRA et al., 1999). A eletronegatividade das argilas, indicada pelo PCZ, faz com que elas atuem atraindo eletrostaticamente o precipitado de  $\text{CaCO}_3$ , se mantendo juntas por forças intermoleculares. Nos labirintos dos gotejadores, uma vez aderidos nas superfícies das PS, o precipitado tende a seguir o fluxo das mesmas, sendo carregados para fora do labirinto do gotejador, justificando assim, as menores condições de obstrução na presença de maior concentração de PS.

#### **4.4 Análise do material de obstrução**

##### **4.4.1 Difração de raios-x**

Após a pesagem do material depositado nos labirintos, a amostra foi recolhida para análise qualitativa e quantitativa das fases cristalinas, utilizando-se difração de raios-x com refinamento pelo método de Rietveld; e, análise das mudanças na morfologia e no hábito cristalino, por meio de microscopia eletrônica de varredura. Os difratogramas são apresentados na Figura 37.



**Figura 37.** Padrões de DR-x das amostras coletadas nos labirintos de gotejadores nas seguintes condições: (a) 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>, (b) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> (c) 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 125 mg L<sup>-1</sup> de PS (d) 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 500 mg L<sup>-1</sup> de PS (e) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 125 mg L<sup>-1</sup> de PS (f) 300 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> + 500 mg L<sup>-1</sup> de PS.

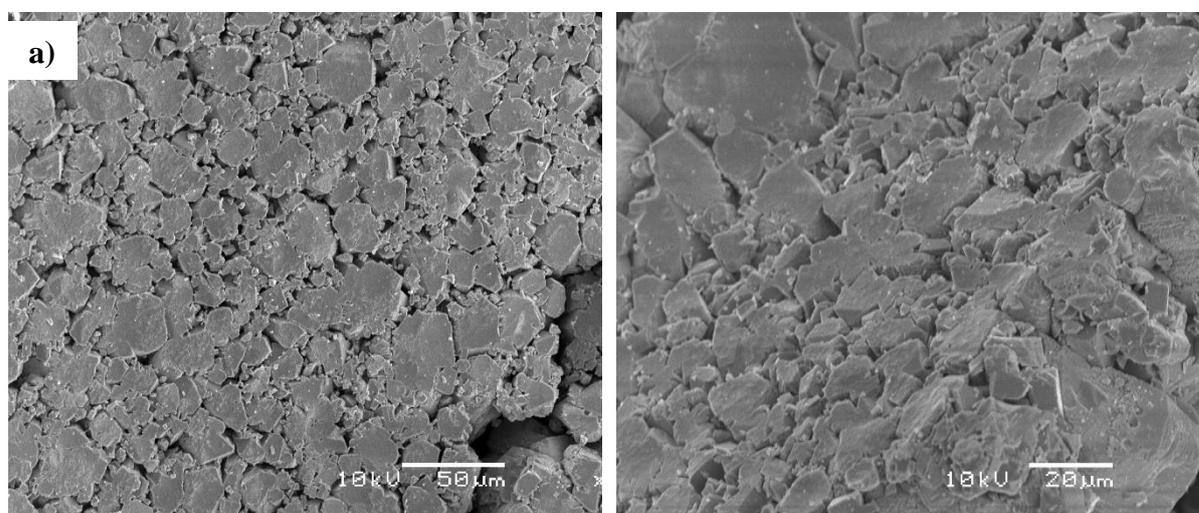
De acordo com os padrões de DR-x, as amostras são constituídas exclusivamente por calcita, que é a fase cristalina do CaCO<sub>3</sub> mais estável e menos solúvel (RAMACHANDRULA; KASA, 2020; RIZK et al., 2017). Embora a calcita seja a forma mais estável termodinamicamente, a aragonita e a vaterita, sob certas condições de temperatura ou na presença de outros íons, podem se estabilizar cineticamente e predominar em relação à calcita, o que não ocorreu neste estudo devido às condições de temperatura e de ausência de outros íons na água. A calcita caracteriza-se por ser uma fase cristalina muito difícil de remover

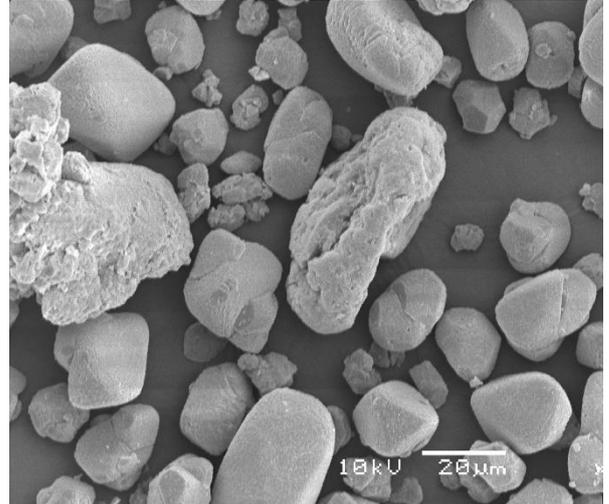
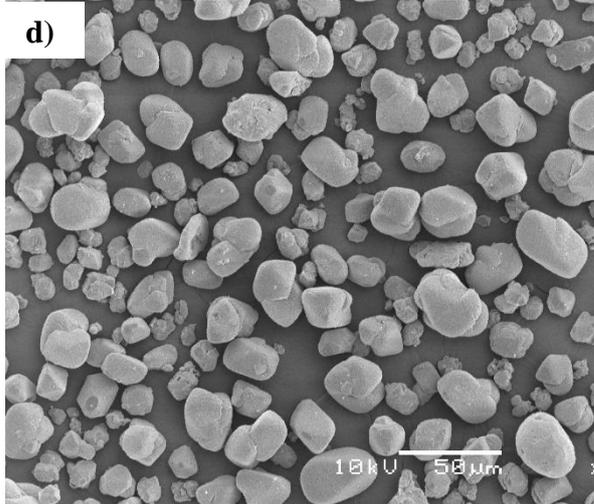
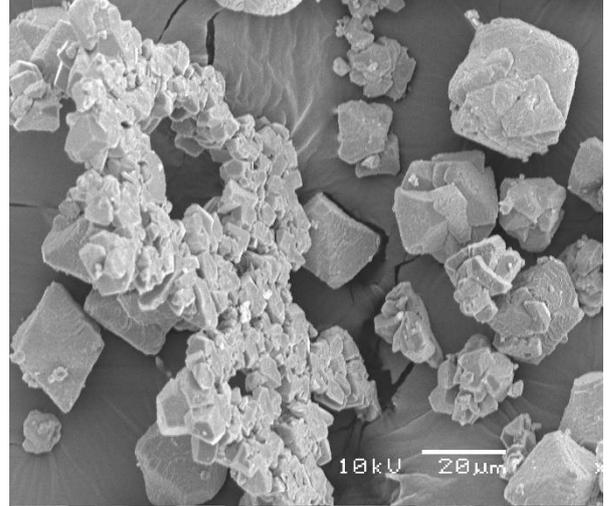
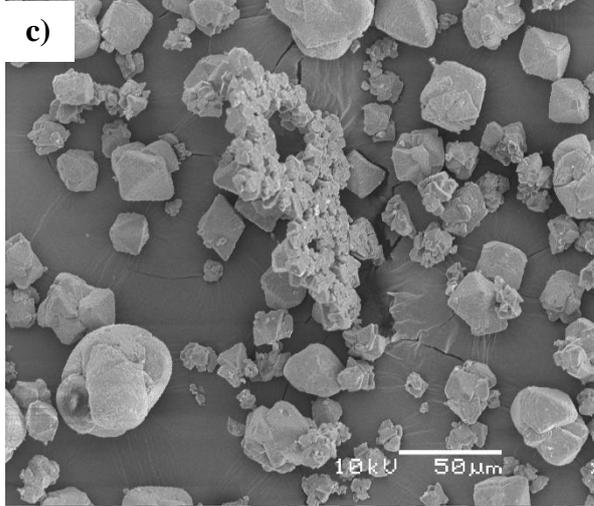
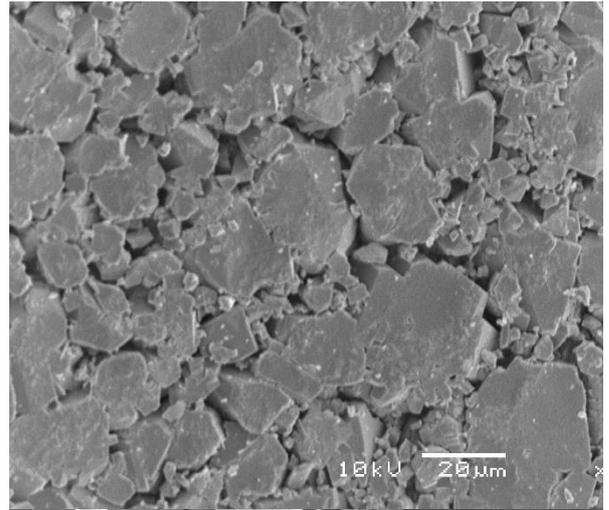
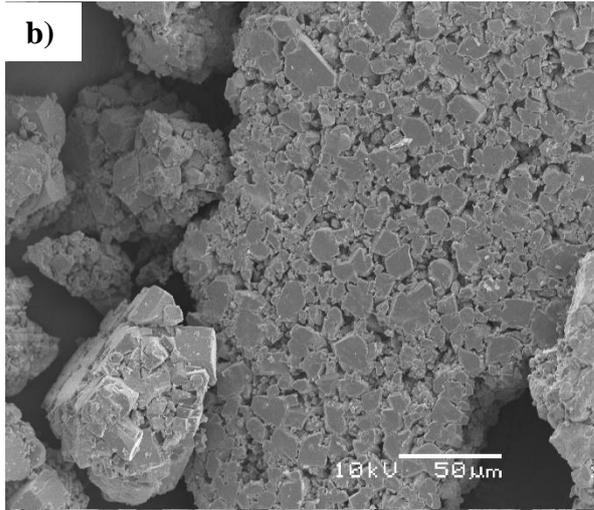
por se fixar fortemente nas paredes de tubulações (SOHAILI et al., 2016). A precipitação do  $\text{CaCO}_3$  na forma de calcita pode implicar diretamente nas medidas corretivas de desobstrução de emissores utilizando-se ácidos, prática comum adotada por irrigantes quando a uniformidade do sistema de irrigação é comprometida devido à emissores obstruídos por depósitos de  $\text{CaCO}_3$ . A presença do polimorfo na forma mais estável, nesse caso, levaria ao aumento do consumo de reagente e maior tempo de aplicação de produto para recuperação do sistema de irrigação, inviabilizando a prática.

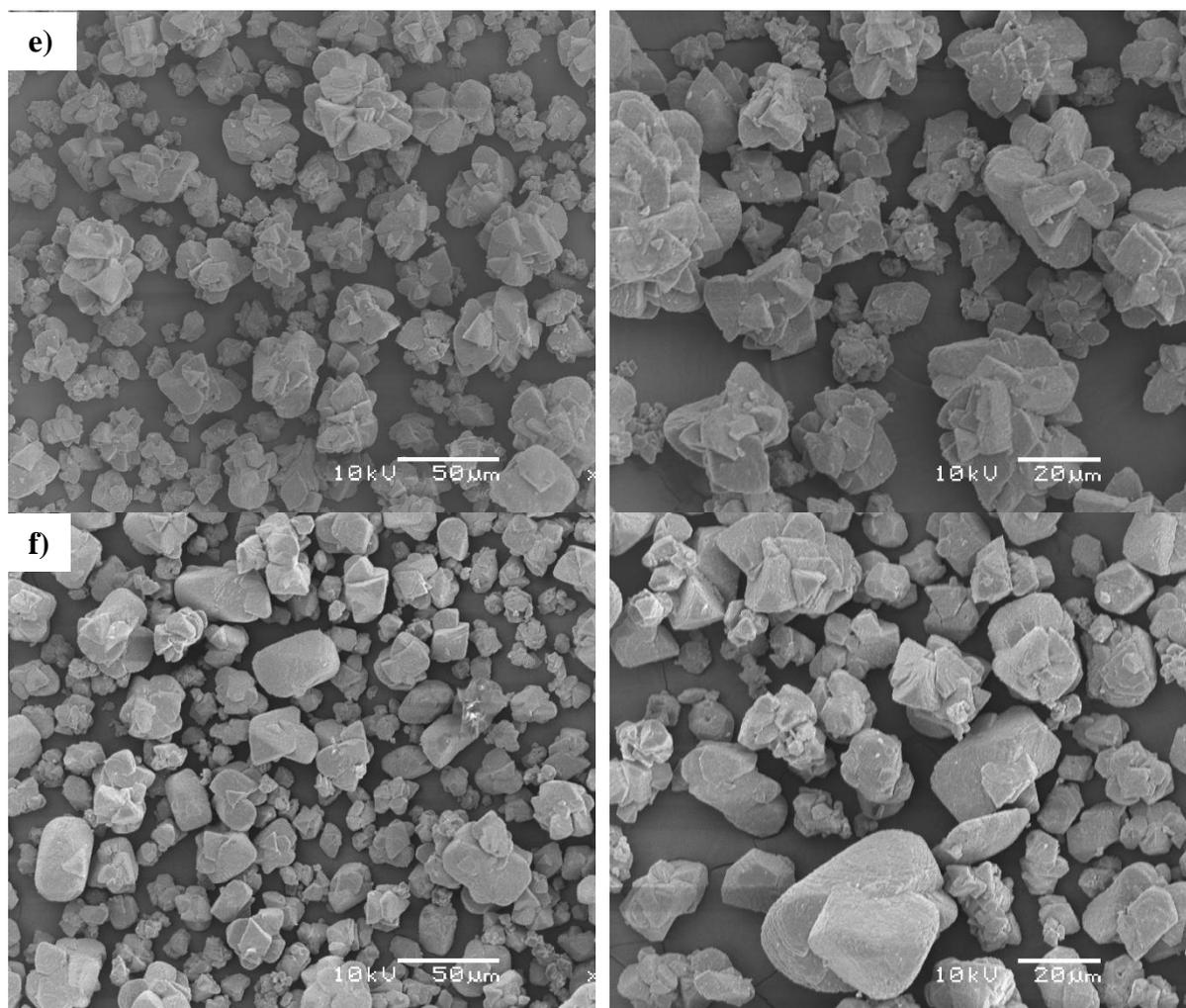
A adição de PS não influenciou a fase cristalina. Embora não se tenha detectado a presença de PS, ressalta-se que, aparentemente, as amostras apresentavam coloração típica de partículas de solo, porém, devido aos mecanismos de adesão e nucleação do  $\text{CaCO}_3$  na sua superfície, essas partículas encontravam-se completamente encobertas pelo precipitado, não sendo detectada na análise de DR-x.

#### 4.4.2 Microscopia eletrônica de varredura

A morfologia do material depositado é mostrada na Figura 38.







**Figura 38.** Morfologia do  $\text{CaCO}_3$  nas seguintes condições: (a)  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ ; (b)  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  (c)  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS; (d)  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS; (e)  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3 + 125 \text{ mg L}^{-1}$  de PS; (f)  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3 + 500 \text{ mg L}^{-1}$  de PS.

Nas Figura 38a e 38b, pode-se observar que os cristais de  $\text{CaCO}_3$  exibem estruturas romboédricas de formato cúbico, que é a estrutura típica da calcita, única fase cristalina presente, evidenciando boa concordância com os resultados de DR-x (KETRANE et al., 2010; LIENDO et al., 2021; SHEIKHOESLAMI; ONG, 2003; SOHAILI et al., 2016). A ampla distribuição dos cristais se deve, provavelmente, a fenômenos de aglomeração (LIENDO et al., 2021). Na ausência de PS, o crescimento de cristais foi afetado pela razão de saturação do sistema. Na condição de água com dureza de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  (Figura 38a), verifica-se que os cristais apresentaram tamanho maior em relação aos cristais formados na condição de água com dureza de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  (Figura 38b). Em sistemas supersaturados, o tempo de nucleação é menor, conseqüentemente, o cristal se forma mais rápido, porém, sua taxa de crescimento é limitada (LIENDO et al., 2021; QIAN et al., 2019; ZUO et al., 2020). Em ambas

as condições, os cristais de calcita encontram-se ligados em uma rede cristalina uniforme, formando aglomerados.

Na presença de PS, o hábito cristalino foi completamente modificado, embora a calcita ainda seja a forma dominante, verifica-se que os cristais se encontram dispersos e ligados às PS, o que ratifica as conclusões a respeito da adesão na superfície. Nas menores concentrações de PS, os cristais ainda tentaram se reorganizar em uma rede cristalina, porém em virtude das modificações da face externa, isso não foi possível. O crescimento dos cristais foi afetado pela presença de PS, as bordas tornaram-se mais arredondadas e, nos tratamentos com maior concentração de PS, (Figura 38d e 16f) partículas maiores sobrepostas apareceram. Costa & Giulietti (2010) citam que a presença de impurezas em concentrações extremamente baixas na solução, já é capaz de provocar grande efeito na morfologia do cristal. Isso confirma que PS podem interferir significativamente na formação e deposição de  $\text{CaCO}_3$  no interior de labirintos de gotejadores

## 5 CONCLUSÕES

Nos experimentos apenas com PS, o acúmulo de sedimentos ocorreu apenas nos primeiros defletores, caracterizados por apresentar baixa velocidade de escoamento e região de fluxo principal indefinida. O acúmulo de PS em 200 h não provocou alterações na vazão dos emissores para classificá-los como obstruídos, assim, pode-se concluir que, nas condições estudadas, PS de granulometria inferior a 125  $\mu\text{m}$  e em concentrações de até 500  $\text{mg L}^{-1}$  não representam risco de obstrução dos protótipos de emissores.

Nos ensaios apenas com água calcária, a deposição e incrustação de  $\text{CaCO}_3$  provocou a obstrução de todos os emissores do modelo B, que apresentam escoamento mais uniforme, e os emissores do modelo B com menor seção de escoamento. Entre os parâmetros geométricos dos labirintos estudados, a área da seção de escoamento foi o que mais influenciou os processos de deposição e incrustação de  $\text{CaCO}_3$ .

Nos ensaios de interação, a adição de PS na água impactou significativamente a deposição de  $\text{CaCO}_3$  nos labirintos e, conseqüentemente, a  $Q_r$  dos gotejadores. O aumento na supersaturação do sistema carbonato reduziu o tempo necessário para que a  $Q_r$  dos gotejadores modelo B atingissem o limiar crítico que caracteriza a obstrução, entretanto, não foi suficiente para provocar a obstrução dos gotejadores modelo A. Em termos de resistência à obstrução, as características geométricas dos labirintos foram dominantes em relação à qualidade da água, sendo a largura do canal e a área da seção de fluxo os parâmetros geométricos que influenciaram significativamente a deposição nos labirintos. O aumento na concentração de PS na água resultou na diminuição da massa depositada nos labirintos e, as PS afetaram as fases de supersaturação e nucleação do  $\text{CaCO}_3$  retardando a formação dos primeiros clusters e aderindo os cristais formados na superfície. Além disso, a nucleação heterogênea é induzida para que ocorra nas paredes das partículas, fazendo com que essas carreguem consigo o precipitando, diminuindo a obstrução do sistema. O  $\text{CaCO}_3$  precipitou na forma de calcita, cuja morfologia foi completamente modificada na presença de PS.

Com relação às hipóteses levantadas: (1) os problemas de obstrução de emissores por precipitados de carbonato de cálcio foram atenuados na presença de partículas sólidas. Os processos de deposição e formação de incrustação nos labirintos de gotejadores foram afetados pela adesão do  $\text{CaCO}_3$  às PS; portanto, a hipótese foi aceita. (2) a presença de partículas sólidas na água influenciou a taxa de formação e crescimento de cristais de carbonato de cálcio, afetando a cinética de formação e a morfologia dos cristais, evidenciados por meio das curvas de precipitação levantadas e pela análise de MEV realizada; portanto, a hipótese foi aceita. (3)

regiões de baixa velocidade no labirinto favoreceram o acúmulo de PS e depósitos de carbonato de cálcio, afetando a vazão dos emissores, entretanto, as incrustações de  $\text{CaCO}_3$  não foram tão dependentes da velocidade, portanto, eliminar regiões de baixa velocidade poderia desfavorecer a deposição de PS, entretanto, outros fatores devem ser levados em consideração em relação à incrustação de  $\text{CaCO}_3$ ; portanto, a hipótese 3 foi parcialmente aceita. (4) os parâmetros geométricos da seção de escoamento do labirinto foram os principais fatores que afetaram a deposição e, conseqüentemente, a obstrução de emissores, destacando a área da seção de escoamento; assim, labirintos com seção de escoamento maior foram mais resistentes à obstrução, mesmo apresentando zonas de vórtices bem desenvolvidas; portanto a hipótese 4 foi aceita. (5) simulações de fluidodinâmica computacional foram úteis para antecipar a identificação de zonas do labirinto com características de fluxo indesejadas, do ponto de vista de resistência à obstrução, principalmente para a deposição de PS, portanto, a hipótese 5 também foi aceita.

Embora os processos de obstrução por precipitados de carbonato de cálcio sejam diferentes dos processos provocados por partículas sólidas, resultados obtidos nesse estudo apontam para evidências de que gotejadores não autocompensantes com melhor desempenho, quando avaliados sob risco de obstrução por partículas sólidas, também apresentam desempenho superior quando avaliados sob risco de obstrução por incrustações de  $\text{CaCO}_3$ . Tal evidência conduz a hipótese de que gotejadores cujo labirinto apresente maior capacidade de transporte de sedimentos são emissores mais resistentes à obstrução. Essa é uma grande contribuição para a compreensão de processos de obstrução, sendo aplicável ao projeto e seleção de labirintos de gotejadores mais resistentes à obstrução, e ainda, na definição de metodologias normatizadas para a avaliação de gotejadores.

## REFERÊNCIAS

- AHMADI, G.; GUO, S.; ZHANG, X. Particle Adhesion and Detachment in Turbulent Flows Including Capillary Forces. <https://doi.org/10.1080/02726350601146432>, v. 25, n. 1, p. 59–76, jan. 2007.
- AIT-MOUHEB, N. 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, 1 jan. 2019.
- AL-MUHAMMAD, J. et al. Micro-PIV characterization of the flow in a milli-labyrinth-channel used in drip irrigation. **Experiments in Fluids**, v. 59, n. 12, p. 1–16, 2018.
- ALAHMAD, M. Experimental Study of Scale Formation in Sea Water Environment. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 17, n. 1, p. 73–86, 1 jan. 2004.
- ALAHMAD, M. Factors Affecting Scale Formation in Sea Water Environments – An Experimental Approach. **Chemical Engineering & Technology**, v. 31, n. 1, p. 149–156, jan. 2008.
- ALSADAIE, S.; MUJTABA, I. M. Crystallization of calcium carbonate and magnesium hydroxide in the heat exchangers of once-through Multistage Flash (MSF-OT) desalination process. **Computers and Chemical Engineering**, v. 122, p. 293–305, 4 mar. 2019.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. DE et al. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no Semi-Árido piauiense 1. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 873–880, 2006.
- ANDRITSOS, N.; KARABELAS, A. J. The influence of particulates on CaCO<sub>3</sub> scale formation. **Journal of Heat Transfer**, v. 121, n. 1, p. 225–227, 1999.
- ANDRITSOS, N.; KARABELAS, A. J.; KOUTSOUKOS, P. G. Morphology and structure of CaCO<sub>3</sub> scale layers formed under isothermal flow conditions. **Langmuir**, v. 13, n. 10, p. 2873–2879, 14 maio 1997.
- APHA. **Standard Methods For The Examination Of Water & Wastewater**. 23. ed. New York: American Public Health Association, 2017.
- AVARO, J. et al. Calcium coordination environment in precursor species to calcium carbonate mineral formation. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 259, p. 344–357, 15 ago. 2019.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. [s.l.: s.n.].
- AZIMI, G. et al. Scale-resistant surfaces: Fundamental studies of the effect of surface energy on reducing scale formation. **Applied Surface Science**, v. 313, p. 591–599, 15 set. 2014.
- BAI, S.; KANG, Y.; WAN, S. Winter wheat growth and water use under different drip irrigation regimes in the North China Plain. **Irrigation Science**, v. 38, n. 3, p. 321–335, 1 maio 2020.
- BANSAL, B.; CHEN, X. D.; MÜLLER-STEINHAGEN, H. Analysis of “classical” deposition rate law for crystallisation fouling. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n. 8, p. 1201–1210, 1 ago. 2008.
- BANSAL, G. et al. A review on materialistic approach to drip irrigation system.

**Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 10712–10717, 1 jan. 2021.

BAYAT, M. et al. **CFD modeling of fouling in crude oil pre-heaters**. Energy Conversion and Management. **Anais...Pergamon**, 1 dez. 2012

BELATTAR, M. et al. Efficiency of one scale inhibitor on calcium carbonate precipitation from hot water sanitary: effect of temperature and concentration. **Heliyon**, v. 7, n. 2, p. e06152, 1 fev. 2021.

BOUNOUA, S. **Etude du colmatage DES SYSTEMES D ' IRRIGATION LOCALISEE**. [s.l.] UNIVERSITE DE PROVENCE AIX-MARSEILLE I, 2010.

BOUNOUA, S. et al. **Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches** Irrigation Science Springer Verlag, , 1 jul. 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.

CABELLO, F. P. **Riegos Localizados De Alta Frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación**. Madrid: Ediciones Mundi-Pensa, 1996.

CAMARGO, A. P. DE et al. Applications of computational fluid dynamics in irrigation engineering. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, p. e20207700, 2020.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Water Quality and Distribution Uniformity in Drip / Trickle Irrigation Systems. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 70, p. 355–365, 1998.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 16, p. 1529–1534, nov. 2007.

CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY. **Handbook of air conditioning system design** . New York: McGraw-Hill, Mei Ya Publication Co, 1965.

CHANG, K. C.; HAMMER, D. A. Influence of direction and type of applied force on the detachment of macromolecularly-bound particles from surfaces. **Langmuir**, v. 12, n. 9, p. 2271–2281, 1 maio 1996.

CHANG, R. et al. **Calcium carbonate precipitation for CO 2 storage and utilization: A review of the carbonate crystallization and polymorphism** Frontiers in Energy Research Frontiers Media S.A., , 10 jul. 2017. Disponível em: <www.frontiersin.org>. Acesso em: 26 mar. 2021

CHENG, J. et al. CFD modeling of nucleation, growth, aggregation, and breakage in continuous precipitation of barium sulfate in a stirred tank. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 15, p. 6992–7003, 5 ago. 2009.

CHEONG, W. C.; GASKELL, P. H.; NEVILLE, A. Substrate effect on surface adhesion/crystallisation of calcium carbonate. **Journal of Crystal Growth**, v. 363, p. 7–21, 15 jan. 2013.

CHHANWAL, N. et al. Computational fluid dynamics modeling of bread baking process. **Food Research International**, v. 44, n. 4, p. 978–983, 1 maio 2011.

CLARK, G. A.; LAMM, F. R.; ROGERS, D. H. Sensitivity of thin-walled drip tape emitter discharge to water temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 21, n. 5, p. 855–864, 2005.

COLLINS, I. R. **A new model for mineral scale adhesion**. Society of Petroleum Engineers - International Symposium on Oilfield Scale 2002. **Anais...Aberdeen**: Society of

Petroleum Engineers, 30 jan. 2002

COSMO, R. DE P. **Modelagem e simulação termodinâmica da precipitação de calcita em condições de poço**. São Mateus: Programa de Pós-Graduação em Energia, 11 jul. 2013.

COSMO, R. DE P. et al. Estimating CO<sub>2</sub> degassing effect on CaCO<sub>3</sub> precipitation under oil well conditions. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 181, p. 106207, 1 out. 2019.

COSTA, C. B. B.; GIULIETTI, M. **Introdução à cristalização: princípios e aplicações**. São Carlos: [s.n.].

DESLOUIS, C. et al. Influence of clay on calcareous deposit in natural and artificial sea water. **Electrochimica Acta**, v. 51, n. 15, p. 3173–3180, 1 abr. 2006.

DIRKSEN, J. A.; RING, T. A. **Fundamentals of crystallization: Kinetic effects on particle size distributions and morphology** *Chemical Engineering Science* Pergamon, , 1 jan. 1991.

DOGAN, E.; KIRNAK, H. Water temperature and system pressure effect on drip lateral properties. **Irrigation Science**, v. 28, n. 5, p. 407–419, dez. 2009.

DUARTE, F. V. **Influência da aplicação de gás carbônico na redução de precipitação de carbonatos em sistema de irrigação localizada**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

DURAN-ROS, M. et al. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 1, p. 67–79, jan. 2009.

EROGLU, S. et al. Bacterial application increased the flow rate of CaCO<sub>3</sub>-clogged emitters of drip irrigation system. **Journal of Environmental Management**, v. 98, p. 37–42, 2012.

FARIA, L. DO A. **Proposta de norma técnica de ensaio para tubogotejadores de irrigação: resistência ao entupimento por particulados sólidos em suspensão**. Piracicaba: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 12 dez. 2012.

FENG, J. et al. 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, 19 jan. 2018.

FENG, J. et al. Composite clogging characteristics of emitters in drip irrigation systems. **Irrigation Science**, v. 37, n. 2, p. 105–122, 24 mar. 2019.

FORD, H. W.; TUCKER, D. P. H. Blockage of drip irrigation filters and emitters by iron-sulfur-bacterial products [*Thiothrix nivea*, *Beggiatoa*]. **Hort. Science**, 1975.

FRIZZONE, J. A. et al. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. 1. ed. Maringá: Eduem, 2012.

FU, Y.; VAN BERK, W.; SCHULZ, H. M. Temporal and spatial development of scale formation: One-dimensional hydrogeochemical transport modeling. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 112, p. 273–283, 1 dez. 2013.

GABRIELLI, C. et al. Electrochemical water softening: principle and application. **Desalination**, v. 201, n. 1–3, p. 150–163, 2006.

GHOBADI NIA, M. et al. Potential risk of calcium carbonate precipitation in agricultural drain envelopes in arid and semi-arid areas. **Agricultural Water Management**, v.

97, n. 10, p. 1602–1608, 1 out. 2010.

GILBERT, R. G. et al. Trickle irrigation: Emitter clogging and other flow problems. **Agricultural Water Management**, v. 3, n. 3, p. 159–178, 1981.

GOPI, S. P.; SUBRAMANIAN, V. K. Polymorphism in CaCO<sub>3</sub> - Effect of temperature under the influence of EDTA (di sodium salt). **Desalination**, v. 297, p. 38–47, 3 jul. 2012.

GOYAL, M. R.; CHAVAN, V. K.; TRIPATHI, V. K. **Principles and management of clogging in micro irrigation**. Boca Raton: Apple Academic Press, 2016.

HASSON, D.; CORNEL, A. Effect of residence time on the degree of CaCO<sub>3</sub> precipitation in the presence of an anti-scalant. **Desalination**, v. 401, p. 64–67, 2 jan. 2017.

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.

HUNTER, R. J. **Introduction to modern colloid science**. New York: Oxford University Press, 1994.

ISO/DTR 21540. **ISO/DTR 21540 - Test methods to evaluate the sensitivity of irrigation emitters to clogging related to water characteristics in controlled (laboratory) and natural (field) conditions**. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/71048.html>>. Acesso em: 7 ago. 2019.

ISO, I. O. FOR S. **ISO - ISO 9261:2004 - Agricultural irrigation equipment — Emitters and emitting pipe — Specification and test methods**. Genebra: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/28459.html>>. Acesso em: 8 dez. 2021.

KAN, A. T.; TOMSON, M. B. **Scale prediction for oil and gas production**. Society of Petroleum Engineers - International Oil and Gas Conference and Exhibition in China 2010, IOGCEC. **Anais...**Society of Petroleum Engineers, 8 jun. 2010

KAROUI, H. et al. Influence of clay suspensions on the precipitation of CaCO<sub>3</sub> in seawater. **Crystal Research and Technology**, v. 45, n. 3, p. 259–266, 2010.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation Design Parameters. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 4, p. 678–684, 1974.

KETRANE, R. et al. Characterization of natural scale deposits formed in southern Algeria groundwater. Effect of its major ions on calcium carbonate precipitation. **Desalination**, v. 262, n. 1–3, p. 21–30, 15 nov. 2010.

KEYSAR, S. et al. Effect of surface roughness on the morphology of calcite crystallizing on mild steel. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 162, p. 311–319, 1994.

KOUTSOUKOS, P. G.; CHEN, T. Calcium Carbonate: Polymorph Stabilization in the Presence of Inhibitors. In: AMJAD, Z. (Ed.). **The Science and Technology of Industrial Water Treatment**. 1. ed. [s.l.] CRC Press, 2010. p. 75–94.

KUBOTA, N.; MULLIN, J. W. A kinetic model for crystal growth from aqueous solution in the presence of impurity. **Journal of Crystal Growth**, v. 152, n. 3, p. 203–208, 1 jul. 1995.

KUKULKA, D. J. An Evaluation of Heat Transfer Surface Materials Used in Fouling Applications. **Heat Transfer Engineering**, v. 26, n. 5, p. 42–46, 2005.

KURIAKOSE, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. **Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products****Trends in Food Science and**

**Technology** Elsevier, , 1 ago. 2010.

LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production: design, operation and management**. [s.l.] Elsevier, 2006.

LANGELIER, W. F. The analytical control of anti-corrosion water treatment. **American Water Works Association**, v. 28, n. 10, p. 1500–1521, 1936.

LANGELIER, W. F. Chemical Equilibria in Water Treatment. **American Water Works Association**, v. 38, n. 2, p. 169–178, 1946.

LAVANHOLI, R. **Avaliação de procedimento de ensaio para determinação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas sólidas**. [s.l.] Dissertação de mestrado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), 2017.

LAVANHOLI, R. **Relações entre características geométricas de gotejadores e dinâmica de obstrução**. [s.l.] Tese de doutorado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2019.

LAVANHOLI, R. et al. Prediction of Pressure–Discharge Curves of Trapezoidal Labyrinth Channels from Nonlinear Regression and Artificial Neural Networks. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, n. 8, p. 04020018, 20 ago. 2020.

LEITE, J. A. O. **Avaliação da susceptibilidade de tubogotejadores ao entupimento por precipitados químicos de carbonato de cálcio**. [s.l.] Universidade Federal de Lavras, 1995.

LI, B. et al. Synthesis, Characterization, and Antibacterial Activity of Cross-Linked Chitosan-Glutaraldehyde. **Marine Drugs**, v. 11, n. 5, p. 1534–1552, 13 maio 2013a.

LI, B. et al. Synthesis, Characterization, and Antibacterial Activity of Cross-Linked Chitosan-Glutaraldehyde. **Marine Drugs**, v. 11, n. 5, p. 1534–1552, 13 maio 2013b.

LI, G. 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. et al. 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, mar. 2008.

LI, Y. et al. Formation mechanism for emitter composite-clogging in drip irrigation system. **Irrigation Science** 2018 **37:2**, v. 37, n. 2, p. 169–181, 30 nov. 2018.

LI, Y. et al. Dynamic effects of chemical precipitates on drip irrigation system clogging using water with high sediment and salt loads. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 833–842, mar. 2019a.

LI, Y. et al. Formation mechanism for emitter composite-clogging in drip irrigation system. **Irrigation Science**, v. 37, n. 2, p. 169–181, 30 mar. 2019b.

LI, Y. K. et al. Hydraulic property and flow characteristics of three labyrinth flow paths of drip irrigation emitters under micro-pressure. **Transactions of the ASABE**, v. 52, n. 4, p. 1129–1138, 2009.

LIENDO, F. et al. Optimization of CaCO<sub>3</sub> synthesis through the carbonation route in a packed bed reactor. **Powder Technology**, v. 377, p. 868–881, 2 jan. 2021.

LILI, Z. et al. Chemical Clogging of Emitters and Evaluation of Their Suitability for Saline Water Drip Irrigation. **Irrigation and Drainage**, v. 65, n. 4, p. 439–450, 1 out. 2016.

LILI, Z. et al. Effects of Drip Irrigation Frequency on Emitter Clogging using Saline

Water for Processing Tomato Production. **Irrigation and Drainage**, 7 fev. 2019.

LILI, Z. et al. Effects of water salinity on emitter clogging in surface drip irrigation systems. **Irrigation Science** **2020** **39:2**, v. 39, n. 2, p. 209–222, 27 ago. 2020.

LINDSAY, W. L. **Chemical Equilibria in Soils**. New York: Wiley-Interscience, 1979.

LIOLIOU, M. G. et al. Heterogeneous nucleation and growth of calcium carbonate on calcite and quartz. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 308, n. 2, p. 421–428, 15 abr. 2007.

LIU, H.; HUANG, G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 5, p. 745–756, 1 maio 2009.

LIU, Z. et al. Dynamic synergistic scale inhibition performance of IA/SAS/SHP copolymer with magnetic field and electrostatic field. **Desalination**, v. 362, p. 26–33, 2015.

MACIEL, R. S. et al. SPE-196180-MS Enhancing Scale Prediction in Pre-Salt Wells Using Numerical Simulation. 2019.

MADRAMOOTOO, C. A.; KHATRI, K. C.; RIGBY, M. Hydraulic performances of five different trickle irrigation emitters. **Canadian agricultural engineering**, v. 30, n. 1, p. 1–4, 1988.

MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C. DE; OLIVEIRA, M. DE. Estimativa de carbonato de cálcio aplicado via água de irrigação nas regiões da Chapada do Apodi e Baixo Açu , RN. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 71–75, 2001.

MARUSCAK, A.; BAKER, C. G. J.; BERGOUGNOU, M. A. Calcium carbonate precipitation in a continuous stirred tank reactor. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 49, n. 6, p. 819–824, 1 dez. 1971.

MELO, R. F. DE; COELHO, R. D.; TEIXEIRA, M. B. Entupimento de gotejadores convencionais por precipitados químicos de carbonato de cálcio e magnésio, com quatro Índices de Saturação de Langelier. **Irriga**, v. 13, n. 4, p. 525–539, 2008.

MENZRI, R.; GHIZELLAOUI, S.; TLILI, M. Calcium carbonate inhibition by green inhibitors: Thiamine and Pyridoxine. **Desalination**, v. 404, p. 147–154, 2017a.

MENZRI, R.; GHIZELLAOUI, S.; TLILI, M. Calcium carbonate inhibition by green inhibitors: Thiamine and Pyridoxine. **Desalination**, v. 404, p. 147–154, 17 fev. 2017b.

MULLIN, J. W. **Crystallization**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Water quality in drip / trickle irrigation : A review. **Irrigation Science**, v. 12, p. 187–192, 1991.

NAKAYAMA, F. S.; BOMAN, B. J.; PITTS, D. J. Maintenance. In: **Developments in Agricultural Engineering**. [s.l.: s.n.].

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Emitter Clogging Effects on Trickle Irrigation Uniformity. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 1, p. 77–80, 1981.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. **Trickle Irrigation for Crop Production : Design, Operation and Management**. [s.l.] Elsevier Science, 1986.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A.; FRENCH, O. F. Reclaiming partially clogged trickle emitters. **Transactions of the ASABE**, v. 20, n. 2, p. 278–280, 1977.

NAM, H. et al. A study on the reduction of CaCO<sub>3</sub>fouling in hot-water storage tank

by short pulse plasma application (rev 1 yc). **Applied Thermal Engineering**, v. 102, p. 108–114, 2016.

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, mar. 2012.

OJANIEMI, U. et al. Wall function model for particulate fouling applying XDLVO theory. **Chemical Engineering Science**, v. 84, p. 57–69, 24 dez. 2012.

OLIVEIRA, F. C. DE. Processo de obstrução causado por partículas de argila em suspensão. p. 117, 2017.

OLIVEIRA, F. C. DE et al. Clogging of drippers caused by suspensions of kaolinite and montmorillonite clays. **Irrigation Science**, v. 38, n. 1, p. 65–75, 1 jan. 2020.

OLIVEIRA, F. C. 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.

PÄÄKKÖNEN, T. M. et al. Crystallization fouling of CaCO<sub>3</sub> – Analysis of experimental thermal resistance and its uncertainty. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 23–24, p. 6927–6937, 1 nov. 2012.

PALAU SALVADOR, G.; ARVIZA VALVERDE, J.; BRALTS, V. F. Hydraulic Flow Behaviour through an In-line Emitter Labyrinth using CFD Techniques. **ASAE Annual International Meeting 2004**, p. 1-, 2004.

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.

PEI, Y. et al. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation. **Irrigation Science**, v. 32, n. 2, p. 141–157, 1 mar. 2014.

PERBONI, A. **Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia**. [s.l.] Tese de doutorado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), 2016.

PEREIRA, D. J. DE S. **Contribuição ao protocolo de normatização de ensaios para a avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas**. [s.l.] Dissertação de mestrado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), 2019.

PEREIRA, D. J. DE S. et al. Evaluating Sensitivity to Clogging by Solid Particles in Irrigation Emitters: Assessment of a Laboratory Protocol. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, n. 11, p. 04020033, 18 nov. 2020.

PITTS, D. J.; HAMAN, D. Z.; SMAJSTRIA, A. G. Causes and prevention of emitter plugging in micro irrigation systems. **Bulletin-Florida Cooperative**, n. 258, p. 1–20, 1990.

PUIG-BARGUÉS, J. et al. Effect of dripline flushing on subsurface drip irrigation systems. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 1, p. 147–155, 2010.

QIAN, M. et al. Crystallization of CaCO<sub>3</sub> in aqueous solutions with extremely high concentrations of NaCl. **Crystals**, v. 9, n. 12, 1 dez. 2019.

QINGSONG, W. 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, 1 out. 2008.

RAMACHANDRULA, V. R.; KASA, R. R. Non-destructive characterization of physical and chemical clogging in cylindrical drip emitters. **Heliyon**, v. 6, n. 10, p. e05327, 1

out. 2020.

RAVINA, I. et al. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, v. 13, n. 3, p. 129–139, set. 1992.

REIS, M. C. et al. Numerical simulation for homogeneous nucleation of calcium carbonate in concentrated electrolyte solutions. **International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements**, v. 6, n. 1, p. 35–45, 31 out. 2017.

REIS, M. C. et al. A two-fluid model for calcium carbonate precipitation in highly supersaturated solutions. **Advanced Powder Technology**, v. 29, n. 7, p. 1571–1581, 1 jul. 2018.

RIBEIRO, B. T. et al. Cargas superficiais da fração argila de solos influenciadas pela vinhaça e fósforo. **Química Nova**, v. 34, n. 1, p. 5–10, 2011.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologias de tratamento**. Edgard Blucher ed. São Paulo: [s.n.].

RIZK, N. et al. Parameters controlling chemical deposits in micro-irrigation with treated wastewater. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 66, n. 8, p. 587–597, 2017.

ROQUES, H. et al. Contribution à l'étude des phénomènes d'entartrage. I: Généralités et méthodes d'étude L.C.G.E. **La Tribune de l'eau**, v. 47, n. 571, 1994.

ROYER, M. et al. Shear Induced Removal of Calcium Carbonate Scale From Polypropylene and Copper Tubes. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 132, n. 1, p. 0110131–0110139, 1 fev. 2010.

ŞAHİN, Ü. et al. Biological treatment of clogged emitters in a drip irrigation system. **Journal of Environmental Management**, v. 76, n. 4, p. 338–341, 1 set. 2005.

SANTOS, R. D. DOS et al. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

SANTOS, H. G. DOS; et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013.

SAWADA, K. The mechanisms of crystallization and transformation of calcium carbonates. **Pure and Applied Chemistry**, v. 69, n. 5, p. 921–928, 1997.

SHEIKHOESLAMI, R. Scaling Potential Index (SPI) for CaCO<sub>3</sub> based on gibbs free energies. **AIChE Journal**, v. 51, n. 6, p. 1782–1789, jun. 2005.

SHEIKHOESLAMI, R.; ONG, H. W. K. Kinetics and thermodynamics of calcium carbonate and calcium sulfate at salinities up to 1.5 M. **Desalination**, v. 157, n. 1–3, p. 217–234, 1 ago. 2003.

SIGNORELLI, F.; SOUSA, M. F. B.; BERTRAN, C. A. Interfacial Phenomena on the Inorganic Scaling Prevention. **ACS Omega**, v. 4, n. 1, p. 79–85, 2 jan. 2019.

SILVEIRA, M. L. A. et al. Energia livre da reação de adsorção de cobre em latossolos ácidos. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 4, p. 1117–1122, 1999.

SIMONIČ, M.; URBANCL, D. Alternating magnetic field influence on scaling in pump diffusers. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 445–450, 2017.

SINGH, C. K. et al. Multivariate statistical analysis and geochemical modeling for geochemical assessment of groundwater of Delhi, India. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 175, p. 59–71, 1 abr. 2017.

SINOBAS, L. R.; 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.

SOHAILI, J. et al. Removal of scale deposition on pipe walls by using magnetic field treatment and the effects of magnetic strength. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 1393–1399, 15 dez. 2016.

SÖHNEL, O.; MULLIN, J. W. Interpretation of crystallization induction periods. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 123, n. 1, p. 43–50, 1 maio 1988.

SOLTANI, M.; AHMADI, G. On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows. <http://dx.doi.org/10.1163/156856194X00799>, v. 8, n. 7, p. 763–785, 1994.

SOUSA, M. F. B. et al. Anti-scaling properties of a SLIPS material prepared by silicon oil infusion in porous polyaniline obtained by electropolymerization. **Surface and Coatings Technology**, v. 325, p. 58–64, 25 set. 2017.

SOUSA, M. F. B.; SIGNORELLI, F.; BERTRAN, C. A. Fast evaluation of inhibitors for calcium carbonate scale based on pH continuous measurements in jar test at high salinity condition. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 147, p. 468–473, 1 nov. 2016.

SPANOS, N.; KOUTSOUKOS, P. G. Kinetics of precipitation of calcium carbonate in alkaline pH at constant supersaturation. Spontaneous and seeded growth. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 102, n. 34, p. 6679–6684, 20 ago. 1998.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry : chemical equilibria and rates in natural waters**. 3. ed. Nova Jersey: Wiley-Interscience, 1996.

SZEKUT, F. D. et al. Hydraulic performance of drippers with different waters and lateral line slopes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 12, p. 813–818, 2018.

TAHERI, M.; BRAGG, G. M. A Study of Particle Resuspension in a Turbulent Flow Using a Preston Tube. <http://dx.doi.org/10.1080/02786829208959534>, v. 16, n. 1, p. 15–20, 1992.

TALAMINI JUNIOR, M. V. **Concentração e granulometria de partículas de areia na obstrução de gotejadores**. [s.l.] Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), 2018.

TESLER, A. B. et al. Extremely durable biofouling-resistant metallic surfaces based on electrodeposited nanoporous tungstite films on steel. **Nature Communications** 2015 **6:1**, v. 6, n. 1, p. 1–10, 20 out. 2015.

THILL, A. et al. Floccs Restructuring during Aggregation: Experimental Evidence and Numerical Simulation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 243, n. 1, p. 171–182, nov. 2001.

TIJING, L. D. et al. Effect of high-frequency electric fields on calcium carbonate scaling. **Desalination**, v. 279, n. 1–3, p. 47–53, 15 set. 2011.

USDA, U. S. D. OF A. M. **Part 623: Irrigation**. Washington: [s.n.]. Disponível em:

<<https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/waterMgt/irrigation/NEH15/ch2.pdf>%0Ahttps://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/irrigation/?cid=stelprdb1045075%0Ahttps://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=>

VALE, H. S. M. et al. HYDRAULIC PERFORMANCE OF DRIPPERS

APPLYING SANITARY LANDFILL LEACHATE DILUTED IN WATER. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 4, p. 987–996, 18 out. 2018.

VAN BERK, W.; FU, Y.; SCHULZ, H. M. Temporal and spatial development of scaling in reservoir aquifers triggered by seawater injection: Three-dimensional reactive mass transport modeling of water-rock-gas interactions. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 135, p. 206–217, 1 nov. 2015.

VAN DER BRUGGEN, B. et al. Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 2, p. 541–549, nov. 2009.

VAZIRIAN, M. M. et al. Surface inorganic scale formation in oil and gas industry: As adhesion and deposition processes. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 137, p. 22–32, 1 jan. 2016.

WALKER, P.; SHEIKHOESLAMI, R. Assessment of the effect of velocity and residence time in CaSO<sub>4</sub> precipitating flow reaction. **Chemical Engineering Science**, v. 58, n. 16, p. 3807–3816, 1 ago. 2003.

WANG, Q. et al. Laboratory study on efficiency of three calcium carbonate scale inhibitors in the presence of EOR chemicals. **Petroleum**, v. 4, n. 4, p. 375–384, 1 dez. 2018.

WARD, J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236–244, 1963.

WEI, Q. et al. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics. **Agricultural Water Management**, v. 84, n. 1, p. 130–136, 2006.

WEI, Q. et al. 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, jun. 2008.

WÓJCIK, J. A.; JONES, A. G. Particle disruption of precipitated CaCO<sub>3</sub> crystal agglomerates in turbulently agitated suspensions. **Chemical Engineering Science**, v. 53, n. 5, p. 1097–1101, 6 fev. 1998.

WU, D. 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, ago. 2013.

YAN, D. et al. Biofilm structure and its influence on clogging in drip irrigation emitters distributing reclaimed wastewater. **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, n. 6, p. 834–841, 1 jan. 2009.

YANG, B. et al. Anti-clogging performance optimization for dentiform labyrinth emitters. **Irrigation Science**, 2020.

YANG, J. Computational fluid dynamics studies on the induction period of crude oil fouling in a heat exchanger tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 159, p. 120129, 1 out. 2020.

YANG, Q. et al. Investigation of calcium carbonate scaling inhibition and scale morphology by AFM. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 240, n. 2, p. 608–621, 15 ago. 2001.

YI-PIN LIN, ‡; PHILIP C. SINGER, \*,‡ AND; AIKEN§, G. R. Inhibition of Calcite Precipitation by Natural Organic Material: Kinetics, Mechanism, and Thermodynamics†. **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 17, p. 6420–6428, 1 set. 2005.

YU, L. et al. 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, abr. 2018.

YU, L. et al. Influence of Dentation Angle of Labyrinth Channel of Drip Emitters on Hydraulic and Anti-Clogging Performance. **Irrigation and Drainage**, v. 68, n. 2, p. 256–267, 2019.

ZHANG, J. et al. 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, abr. 2007.

ZHANG, J. et al. Anti-clogging performance evaluation and parameterized design of emitters with labyrinth channels. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 74, n. 1, p. 59–65, out. 2010.

ZHANG, J. et al. Structural optimization of labyrinth-channel emitters based on hydraulic and anti-clogging performances. **Irrigation Science**, v. 29, n. 5, p. 351–357, out. 2011.

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. 5, p. 414–418, 13 nov. 2013.

ZHANG, L. et al. Effect of pulsating pressure on labyrinth emitter clogging. **Irrigation Science**, v. 35, n. 4, p. 267–274, jul. 2017.

ZHANGZHONG, L. et al. Effects of Drip Irrigation Models on Chemical Clogging under Saline Water Use in Hetao District, China. **Water**, v. 10, n. 3, p. 345, 20 mar. 2018.

ZHANGZHONG, L. et al. A kinetic model for the chemical clogging of drip irrigation system using saline water. **Agricultural Water Management**, v. 223, p. 105696, 20 ago. 2019.

ZHENG, T.; QIAN, C. Influencing factors and formation mechanism of CaCO<sub>3</sub> precipitation induced by microbial carbonic anhydrase. **Process Biochemistry**, v. 91, p. 271–281, 1 abr. 2020.

ZHOU, B. et al. Chemical Clogging Behavior in Drip Irrigation Systems Using Reclaimed Water. **Transactions of the ASABE**, v. 61, n. 5, p. 1667–1675, 2018.

ZHOU, B. et al. Critical controlling threshold of internal water shear force of anti-clogging drip irrigation emitters using reclaimed water. **Irrigation Science**, v. 37, n. 4, p. 469–481, 19 jul. 2019a.

ZHOU, H. et al. Composite fouling of drip emitters applying surface water with high sand concentration: Dynamic variation and formation mechanism. **Agricultural Water Management**, v. 215, p. 25–43, abr. 2019b.

ZUO, Z. et al. Effect of scale inhibitors on the structure and morphology of CaCO<sub>3</sub> crystal electrochemically deposited on TA1 alloy. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 562, p. 558–566, 7 mar. 2020.