

## GEOMETRIA DE LABIRINTOS DE EMISSORES E DEPOSIÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO

GUSTAVO LOPES MUNIZ<sup>1</sup>, DIEGO JOSÉ SOUSA PEREIRA<sup>2</sup>, NICOLAS DUARTE CANO<sup>3</sup>, JONESMAR DE OLIVEIRA<sup>4</sup>, ANTONIO PIRES DE CAMARGO<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Eng. Agrícola e Ambiental, Doutorando em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, Campinas – SP, Fone: (019) 3521-1019, gustavo.l.muniz@feagri.unicamp.br

<sup>2</sup> Eng. Agrícola e Ambiental, Doutorando em Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da USP, Piracicaba - SP

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Doutorando em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, Campinas - SP

<sup>4</sup> Estudante de Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, Campinas - SP

<sup>5</sup> Eng. Agrônomo, Professor doutor, Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, Campinas - SP

Apresentado no  
L Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2021  
08 a 10 de novembro de 2021 - Congresso On-line

**RESUMO:** Depósitos de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) são frequentemente relatados como causa de obstrução em emissores de irrigação. Neste estudo, três protótipos de labirintos de gotejadores com diferentes configurações geométricas, operados com água calcária, foram avaliados em relação à sensibilidade de obstrução por  $\text{CaCO}_3$  e em relação aos padrões de deposição no labirinto. Os protótipos foram projetados e construídos em placas de acrílico e apresentam características similares aos labirintos de emissores comerciais. Os ensaios foram conduzidos em laboratório sob condições controladas utilizando-se água calcária sintética com dureza de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ . Os protótipos foram operados durante 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. Os resultados obtidos mostraram que emissores que apresentam menor área de escoamento são mais susceptíveis à obstrução por depósitos de  $\text{CaCO}_3$ . Além disso, verificou-se que os padrões de deposição de precipitado no defletor são influenciados pelas condições de escoamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** gotejamento, microirrigação, incrustação, engenharia de irrigação

### EMITTER LABYRINTHS GEOMETRY AND CALCIUM CARBONATE SCALE

**ABSTRACT:** Calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) scaling is often reported as a cause of clogging in irrigation emitters. In this study, three dripper labyrinth prototypes of different geometric configurations, operated with hard water, were evaluated in relation to the sensitivity of clogging by  $\text{CaCO}_3$  and in relation to the patterns of scaling in the labyrinth. Prototypes were designed and made of acrylic sheets and have characteristics similar to the labyrinths of commercial emitters. The tests were carried out in laboratory under controlled conditions using synthetic water with hardness of  $200 \text{ mg L}^{-1}$  as  $\text{CaCO}_3$ . The prototypes were operated for 200 h and every 40 h the relative discharge of each model was determined. Images of the interior of the labyrinths were obtained using a high-resolution camera. The results indicated that emitters that have a smaller flow area are more susceptible to clogging by  $\text{CaCO}_3$  scale. Furthermore, it was found that the patterns of scaling in deflector are influenced by the flow conditions.

**KEYWORDS:** drip irrigation, microirrigation, fouling, irrigation engineering

**INTRODUÇÃO:** A obstrução de emissores tem sido frequentemente relatada como um dos principais problemas em sistemas de irrigação por gotejamento (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979; CAMARGO et al., 2020; NAKAYAMA; BUCKS, 1986; PEREIRA et al., 2020). Processos de obstrução de emissores são influenciados pela qualidade da água de irrigação e pelas dimensões e geometria dos labirintos, e têm como origem a ação individual ou combinada de agentes de natureza física, química e biológica (GOYAL; CHAVAN; TRIPATHI, 2016; NAKAYAMA; BUCKS, 1986; XIAO et al., 2020). Entre os agentes de natureza química, o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) é um dos compostos químicos mais comuns encontrados nos labirintos de gotejadores (LILI et al., 2016; SAHIN; TUNC; EROĞLU, 2012; TROFA et al., 2019). No Brasil, problemas de obstrução devido a precipitados de carbonato de cálcio são relatados em regiões de São Paulo, no norte de Minas Gerais e em parte do nordeste do país (DUARTE, 2010; LEITE, 1995; MAIA; MORAIS; OLIVEIRA, 2001; MELO; COELHO; TEIXEIRA, 2008). Além disso, é comum o uso de águas subterrâneas para irrigação, geralmente provenientes de aquíferos de formação calcária, ricas em carbonato, bicarbonato e cálcio (DUARTE, 2010; GOYAL; CHAVAN; TRIPATHI, 2016). Estudos com foco no entendimento dos processos de deposição do precipitado e formação da incrustação em labirintos de gotejadores ainda são escassos na literatura (LI et al., 2019). Nesse artigo, a influência das características geométricas de protótipos de labirintos de gotejadores foi avaliada em relação à resistência à obstrução e aos padrões de deposição de precipitados de  $\text{CaCO}_3$  no interior dos labirintos.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP (LHI/FEAGRI/UNICAMP). Protótipos de labirintos projetados e construídos por Lavanholi et al. (2020) foram utilizados nos ensaios. Três protótipos labirinto de emissores – Modelo A, Modelo B e Modelo C – com diferentes configurações geométricas (Figura 1) foram utilizados como objeto de estudo.

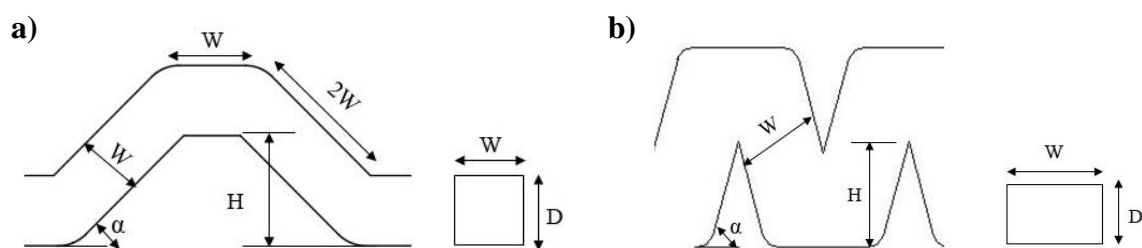


FIGURA 1. Geometria do Modelo A (a) e dos Modelos B e C (b). (W) largura do canal; (H) altura do dente; (D) profundidade do canal; ( $\alpha$ ) ângulo do dente.

Os protótipos foram projetados e fabricados utilizando fresagem, em placas de acrílico, com auxílio de uma máquina com Comando Numérico Computadorizado (CNC), sendo que detalhes de projeto podem ser consultados em Lavanholi et al. (2020). O modelo A apresenta zonas mínimas de formação de vórtice durante o escoamento e maior seção de fluxo principal, o que evita zonas de recirculação e pode favorecer a capacidade de transporte de partículas ao longo do labirinto. Já os Modelos B e C seguem a tendência atual de projeto de labirintos de gotejadores e foram projetados para favorecer a formação de zonas de vórtices durante o escoamento, sendo que o Modelo C apresenta vórtices mais desenvolvidos do que o Modelo B. As características geométricas de cada modelo são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Características geométricas dos protótipos de labirintos.

**Geometric characteristics of labyrinth prototypes.**

Modelo	$Q$ (L h <sup>-1</sup> )	$W$ (mm)	$D$ (mm)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$H$ (mm <sup>2</sup> )	$\alpha$ (°)	$\varphi$	$N$	$L$ (mm)
A	1,4	0,5	0,5	0,25	0,71	45	2,23	37	89,32
B	1,5	0,7	0,8	0,49	0,70	75	17,71	23	33,33
C	1,5	1,3	0,8	1,69	1,56	75	28,84	49	131,89

$Q$  – vazão;  $W$  - largura do canal;  $D$  - profundidade do canal;  $A$  - área da seção de fluxo;  $H$  - altura do dente;  $\alpha$  - ângulo do dente;  $\varphi$  - coeficiente de perda de carga;  $N$  - número de defletores;  $L$  - comprimento do labirinto.

Os protótipos de emissores apresentam características similares aos labirintos de emissores comerciais, porém são fabricados em material transparente (acrílico) que possibilita a filmagem e observação do transporte e acúmulo de sedimentos no interior do labirinto, que foram realizados utilizando um microscópio eletrônico acoplado a uma câmera de alta resolução. Foi utilizada uma bancada de ensaios (Figura 2a), constituindo um circuito hidraulicamente fechado, composto por um reservatório de 80 L para armazenamento da água utilizada nos ensaios; uma motobomba com rotor e carcaça em aço inoxidável; uma calha plástica, responsável por coletar e retornar a água ao reservatório; manômetro digital para controle da pressão (1 bar) na linha; câmera com lupa microscópica para aquisição de imagens (Figura 2b); e, uma peneira no final da calha para retenção de possíveis contaminantes. A velocidade de escoamento na linha foi de, aproximadamente, 1 m s<sup>-1</sup>, sendo controlada por um bocal de diâmetro apropriado instalado no final da linha lateral.

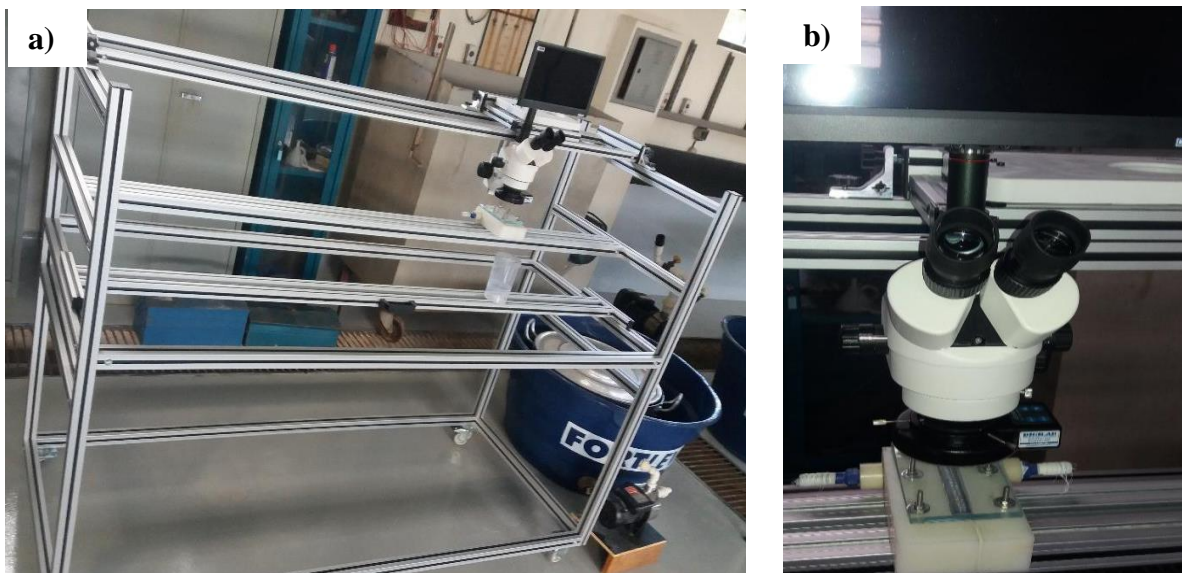


FIGURA 2. Bancada de ensaios (a); câmera para aquisição de imagens dos protótipos de labirinto de gotejador.

A temperatura da água foi mantida em valor padrão (ISO9261, 2004) 23 °C, controlada por meio de um sistema de resfriamento em banho maria. Água calcária sintética com dureza de 200 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub> foi utilizada nesse estudo. A água calcária foi preparada utilizando água deionizada através da adição de reagentes puramente analíticos, cloreto de cálcio dihidratado (CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) e bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>). Dois recipientes contendo solução estoque de NaHCO<sub>3</sub> (0,32 M) e CaCl<sub>2</sub>2H<sub>2</sub>O (0,16 M) foram acoplados à bancada e duas bombas

peristálticas foram responsáveis pelo bombeamento das soluções estoque para o reservatório. A adição contínua de reagentes foi necessária para manter a dureza da água constante ao longo dos dias de ensaio. O Índice de Saturação de Langelier (ISL) foi calculado de acordo com Eroglu et al. (2012), sendo que valores positivos indicam tendência de precipitação deste sal. Os protótipos foram ensaiados simultaneamente. No início de cada ensaio aferiu-se a vazão inicial dos emissores, que foi utilizada como referência no cálculo da vazão relativa. Os ensaios foram realizados em ciclos de 12 h, com 10 h operando e 2 h em repouso, com duração de 20 ciclos, totalizando 200 h de operação (10 dias). O pH da água estabilizou-se em  $8,0 \pm 0,1$  ao longo dos ensaios. A cada quatro ciclos foi mensurada a vazão dos emissores por determinações de massa de água.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A vazão relativa dos emissores, bem como, o ISL ao longo dos dias de ensaio são mostrados na Figura 3.

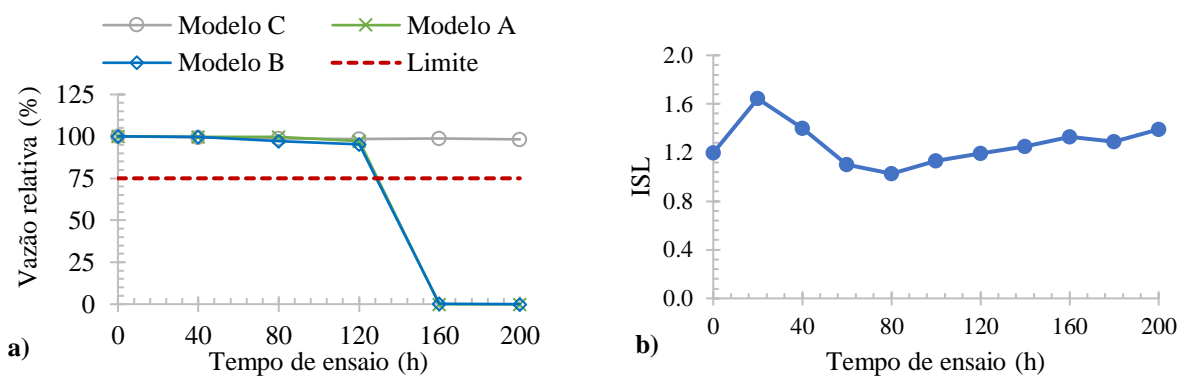


FIGURA 3. Vazão relativa dos protótipos de emissores (a) e índice de saturação de Langelier da água, ao longo das horas de ensaio (b).

Os Modelos A e B obstruíram por depósito de  $\text{CaCO}_3$  com 120 h de ensaio (Figura 3a), apresentando vazão relativa igual a zero. Diferente desses modelos, o Modelo C não obstruiu durante 200 h de ensaio, apresentando vazão relativa de 98,2% no final do teste. Como característica comum, os emissores obstruídos são os que apresentam menor seção de escoamento (Modelo A =  $0,25 \text{ mm}^2$  e Modelo B =  $0,49 \text{ mm}^2$ ), diferente do Modelo C, que apresenta seção de escoamento de  $1,69 \text{ mm}^2$ . O Modelo B, embora seja um emissor que favoreça a formação de vórtices durante o escoamento, apresenta menor relação H/W do que o Modelo C, portanto, os vórtices formados no Modelo B são menos desenvolvidos, o que reduz a capacidade de autolimpeza e favorece o acúmulo de incrustações na periferia da zona de fluxo principal. Além disso, tais características tornam o Modelo B mais similar ao emissor A, de escoamento uniforme, justificando a sensibilidade a obstrução por água calcária. Inicialmente, supôs-se que emissores de escoamento uniforme poderiam ser resistentes à deposição de  $\text{CaCO}_3$  no labirinto por apresentarem maior seção de fluxo principal e velocidade média de escoamento elevada, desfavorecendo a deposição e formação de incrustação nesses emissores, o que não foi constatado. A relação entre área de escoamento e formação de depósitos de  $\text{CaCO}_3$ , pode ser explicada devido ao mecanismo de aglomeração de cristais que ocorre no processo de cristalização. A aglomeração é um fenômeno comum quando se tem altas supersaturações e cristais relativamente pequenos, e 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 da solução concentrada levando

ao aumento do cristal, ou mesmo, podem aderir outros cristais em crescimento, sendo que, ambos os processos originam cristais maiores (COSTA; GIULIETTI, 2010). Assim, emissores que apresentam seção de escoamento relativamente menores são mais susceptíveis à obstrução completa do canal em menor tempo de operação. Imagens obtidas do interior dos labirintos (Figura 4) permitiram constatar forte influência do perfil de escoamento nos locais de depósitos, podendo-se destacar o seguinte: no Modelo A, a deposição de  $\text{CaCO}_3$  ocorreu de maneira uniforme num mesmo defletor (Figura 4a) e não há locais preferenciais de deposição; no Modelo B, foi verificado que os depósitos ocorreram principalmente na seção de entrada, o que tem sido atribuído à reduzida área de escoamento (Figura 4b); e, no Modelo C, observou-se pouco acúmulo na zona de escoamento principal e maior volume de depósitos de  $\text{CaCO}_3$  nas zonas de baixa velocidade (Figura 4c).

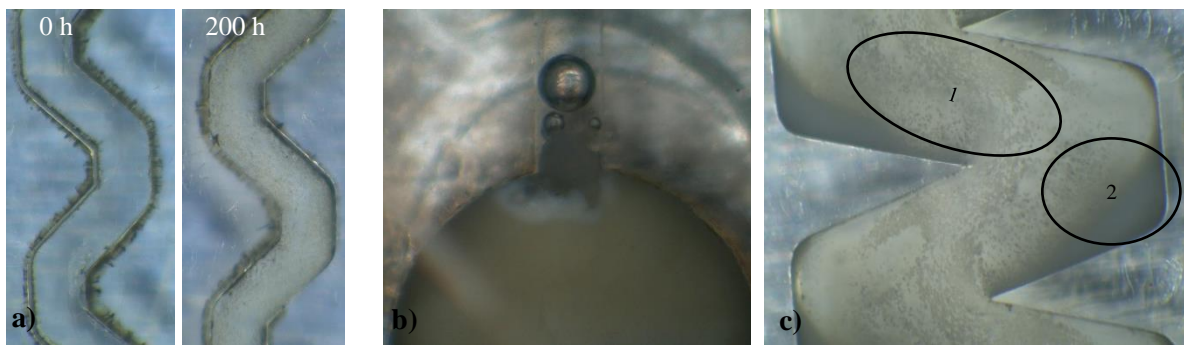


FIGURA 4. Deposição de  $\text{CaCO}_3$  no Modelo A (a), Modelo B (b), e Modelo C (c).

Os processos de deposição e incrustação de  $\text{CaCO}_3$  são altamente dependentes das condições de escoamento, podendo ocorrer em dois passos: 1) transporte do cristal para a superfície; e, 2) ligação do cristal com essa superfície (COSMO et al., 2019). 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, os depósitos observados nas regiões de baixa velocidade (região 2 na Figura 4c) podem ser atribuídos aos cristais já formados, que se depositam devido a forças gravitacionais, podendo estes serem maiores ou menores. 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 dois possíveis fenômenos. Na primeira suposição, a região central apresenta viscosidade mais baixa devido a maior turbulência e, sendo a solução um fluido Newtoniano, a taxa de incrustação pode ser observada nessa zona (OJANIEMI et al., 2012). A força que afeta a migração das partículas na região próxima à parede, a difusão browniana, é inversamente proporcional à viscosidade do fluido, portanto, se a viscosidade da suspensão diminuir, a taxa de incrustação aumenta, levando ao surgimento de cristais nas zonas de escoamento principal. Ainda, segundo Vazirian et al. (2016), um aumento no nível de turbulência pode aumentar a taxa de formação de incrustação na superfície nos processos de deposição e adesão. Estes autores também observaram que a taxa de formação de incrustação superficial é controlada predominantemente pela nucleação heterogênea e pelo crescimento do cristal em vez da adesão das partículas pré-cristalizadas de carbonato de cálcio. A segunda suposição é de que os cristais depositados na região de fluxo principal são relativamente maiores do que os depositados nas regiões de canto, assim esses cristais são 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. A formação de incrustação também foi observada na região de entrada e na região de saída dos emissores (Figura 5). 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, 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). Emissores que possuem menor área de escoamento podem estar 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 foram observados em estudos anteriores (RAMACHANDRULA; KASA, 2020), indicando que devem ser feitas modificações na geometria do labirinto de modo que a área de entrada tenha aberturas maiores. Por um lado, o projeto de emissores com entradas de labirintos maiores poderia retardar o processo de obstrução, por outro, sabendo-se que, uma vez que há depósito de cristais numa determinada superfície, mecanismos de aglomeração são inevitáveis e irão formar entidades cristalinas maiores e mais estáveis; assim, com o tempo, mesmo emissores com maior área de abertura poderão ter as entradas obstruídas completamente por depósitos de  $\text{CaCO}_3$ . Modificações na geometria do emissor que permita escoamento com mecanismos de quebras do cristal aderido ou de não aderência são sugeridas nesse estudo como maneiras mais efetivas para a prevenção da obstrução por  $\text{CaCO}_3$  a longo prazo.

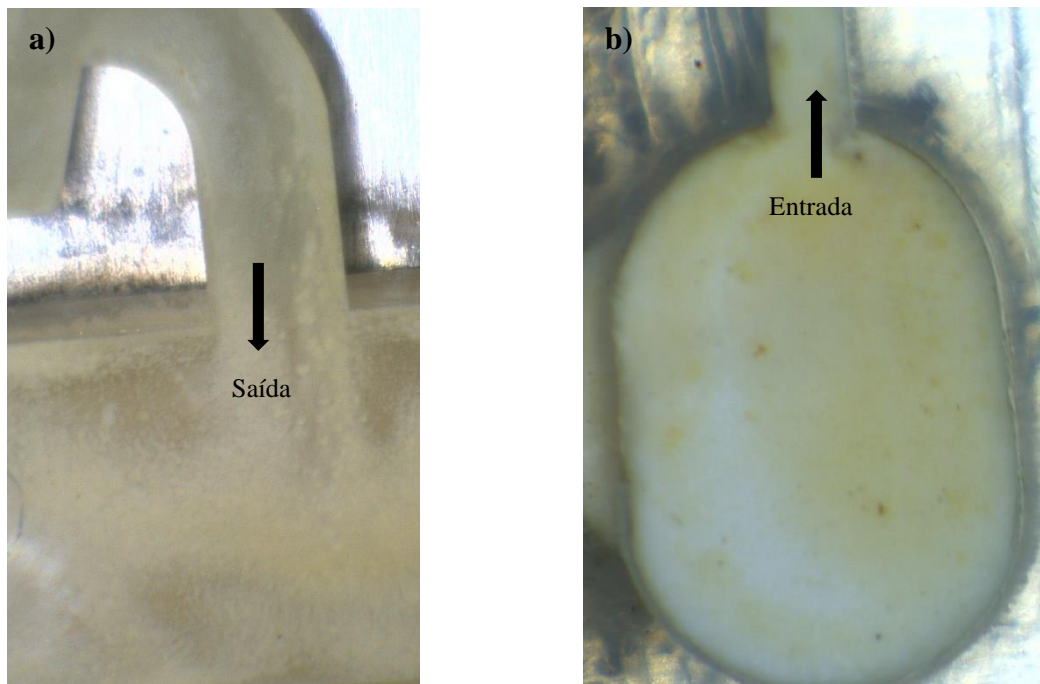


FIGURA 5. Depósitos de  $\text{CaCO}_3$  (a) na saída do labirinto do Modelo C, e (b) na entrada do labirinto do Modelo B.

**CONCLUSÕES:** A seção de escoamento foi o parâmetro geométrico que mais interferiu na deposição, sendo os emissores com menor seção de escoamento mais sensíveis à alteração na vazão devido à depósitos de  $\text{CaCO}_3$  no canal. Os resultados também evidenciaram que a deposição e incrustação de  $\text{CaCO}_3$  no defletor são dependentes das condições de escoamento, podendo ocorrer de maneira uniforme em emissores com zonas mínimas de vórtice e de maneira não uniforme nos emissores com vórtices bem desenvolvidos. Modificações na geometria do labirinto do emissor que permitam escoamento com mecanismos de quebras das entidades cristalinas aderidas á superfície são sugeridas nesse estudo como maneiras que podem ser efetivas para a prevenção da obstrução de gotejadores por depósitos de  $\text{CaCO}_3$  a longo prazo.

**AGRADECIMENTOS:** À FAPESP, pelo financiamento do projeto (2018/20099-5) e à Capes, pela concessão da bolsa de estudo (88882.434695/2019-01).

## **REFERÊNCIAS:**

- 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.
- BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R. G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, v. 2, n. 2, p. 149–162, 1979.
- CAMARGO, A. P. DE et al. Applications of computational fluid dynamics in irrigation engineering. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, p. e20207700, 2020.
- 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. 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.].
- 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.
- 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, n. 1, p. 37–42, 15 maio 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.
- GOYAL, M. R.; CHAVAN, V. K.; TRIPATHI, V. K. **Principles and management of clogging in micro irrigation**. Boca Raton: Apple Academic Press, 2016.
- ISO9261. **Agricultural irrigation equipment - Emitters and emitting pipe - Specification and test methods**, 2004.
- 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
- 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, Y. et al. Formation mechanism for emitter composite-clogging in drip irrigation system. **Irrigation Science**, v. 37, n. 2, p. 169–181, 30 mar. 2019.
- 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.
- 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.
- 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.

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

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

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.

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.

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.

SAHIN, U.; TUNC, T.; EROĞLU, S. Evaluation of CaCO<sub>3</sub> clogging in emitters with magnetized saline waters. **Desalination and Water Treatment**, v. 40, n. 1–3, p. 168–173, fev. 2012.

TROFA, M. et al. CFD-DEM simulations of particulate fouling in microchannels. **Chemical Engineering Journal**, v. 358, p. 91–100, 15 fev. 2019.

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.

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.

XIAO, Y. et al. Increasing phosphorus availability by reducing clogging in drip fertigation systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121319, 20 jul. 2020.