

AValiação de Danos Químicos em Membranas de Compensação de Gotejadores, Causado pela Aplicação Dinâmica de Dose Extrema de Cloro Livre (Parte I)

Marconi Batista Teixeira; Rubens Duarte Coelho; Ralini Ferreira de Mélo

Departamento de Engenharia Rural, Área: Irrigação e Drenagem, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, marconi@esalq.usp.br

1 RESUMO

Com o propósito de avaliar a susceptibilidade de membranas de compensação de pressão de 14 modelos de gotejadores autocompensantes ao processo de dano químico, causado pela aplicação dinâmica de 100 mg L⁻¹ de cloro livre, foi conduzido um experimento no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Semanalmente foi feita a coleta de água utilizando o método gravimétrico por um período de dez min para todos os emissores presentes na linha gotejadora de cada um dos modelos estudados. Ocorreu um decréscimo de 10 a 20% em média da vazão (L h⁻¹) para a maior parte dos emissores, com exceção do modelo E que apresentou aproximadamente 90% de redução de vazão (13% de aumento de volume da membrana) com 2688 h de funcionamento e redução drástica de vazão na ordem de 100% em virtude do bloqueio total do orifício para o emissor I, em decorrência do aumento de 112% do volume da membrana após 2688 h de aplicação dinâmica de 100 mg L⁻¹ de cloro livre com pH na faixa de 5,5 a 6,0.

UNITERMOS: cloração, elastômero, entupimento de emissores.

TEIXEIRA, M. B.; COELHO, R. D.; MÉLO, R. F. de. EVALUATION OF CHEMICAL DAMAGES ON SELF-COMPENSATING DRIPPER MEMBRANE, CAUSED BY DYNAMIC APPLICATION OF EXTREME DOSE OF FREE CHLORINE (PART I)

2 ABSTRACT

In order to evaluate the chemical resistance of 14 compensating emitters to the dynamic application of 100 mg L⁻¹ of free chlorine, an experiment was carried out under laboratory conditions at the University of São Paulo, Brazil. Emitter flow was weekly evaluated using the gravimetric method. Later on, it was calculated: average flow rate (q_m), and percentage of emitters according to flow rate reduction. An average reduction from 10 to 20% of the flow rate (L h⁻¹) for most of the emitters was observed, except for the model “E” that presented approximately 90% of flow rate reduction (13% of increase of volume of the membrane) in 2688 h of operation and drastic reduction of flow rate of 100% (total clogging) for emitter model “I”, due to the increase of 112% membrane volume after 2688 h of dynamic application of 100 mg L⁻¹ of chlorine free with pH 5.5 to 6.0.

KEY WORDS: chlorination, elastomer, emitter clogging.

3 INTRODUÇÃO

O entupimento de emissores continua sendo o principal problema em sistemas de irrigação por gotejamento. Para culturas anuais de alto valor econômico e para culturas perenes, onde a longevidade do sistema é especialmente importante, emissores entupidos podem ocasionar perdas econômicas. Embora estejam disponíveis informações quanto aos fatores que causam o entupimento, o controle por medidas preventivas nem sempre tem êxito. Não há um método quantitativo simples e único para calcular o potencial de entupimento de um determinado sistema de irrigação por gotejamento. Porém, analisando a água para alguns componentes específicos, pode-se, antecipar possíveis problemas e formular medidas de controle. A qualidade da água também pode mudar ao longo do ano de forma que amostras de água deveriam ser analisadas em diferentes períodos da irrigação (Pizarro, 1996).

A obstrução dos emissores está diretamente relacionada à qualidade da água de irrigação. Portanto, os sólidos em suspensão, a composição química e a atividade microbológica ditam o tipo de tratamento de água necessário para prevenção das obstruções (Nakayama & Bucks, 1991).

A aplicação de cloro é o método mais comum para controlar populações microbológicas (Pitts et al., 1990). A eficiência do tratamento está diretamente relacionada ao pH da água, devendo-se ressaltar que, para valores altos de pH, maiores quantidades de cloro são requeridas. Em alguns casos, esclarecem os autores, a injeção contínua de cloro na água dos sistemas de irrigação localizada, mesmo que eficiente, pode não ser economicamente justificável.

Padmakumari & Sivanappan (1985) avaliaram o uso de hipoclorito de sódio a 500 mg L⁻¹, sulfato de cobre a 1% e ácido clorídrico a 2% para a recuperação de gotejadores entupidos e observaram que o tratamento com hipoclorito de sódio foi o mais efetivo para aumentar a vazão dos emissores. Com gotejadores parcialmente entupidos, Pizarro (1996) recomenda a aplicação de 250 a 500 mg L⁻¹ de cloro durante 12 h, seguida de uma lavagem com água em alta pressão.

Quanto ao controle do entupimento, alertam Schischa et al. (1997) que o uso de doses elevadas de cloro pode prejudicar a regulação da membrana elástica dos emissores. Sendo, assim, o uso de superclorações, para a recuperação de emissores entupidos, deve ser mais bem avaliado, uma vez que não existem em literatura e tampouco em manuais técnicos informações sobre dosagens limites para os emissores autocompensantes.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, utilizando-se uma bancada de ensaios em estrutura metálica, com 11,0 m de comprimento por 4,0 m de largura e 5,80 m de altura (Figura 1).



Figura 1. Foto da Bancada de ensaios e detalhe do Setor 1, onde foi realizado o ensaio.

No nível 1 do Setor 1 da Bancada de ensaios foi realizado o tratamento com cloro em condição dinâmica (aplicação contínua/24 h dia⁻¹ durante 2688 h) com 100 mg L⁻¹ de hipoclorito de sódio (12%) com pH na faixa de 5,5 a 6,0.

Selecionaram-se 14 modelos de gotejadores autocompensantes existentes no mercado nacional, utilizando-se os mais comercializados segundo os fabricantes, embora ocorra uma variação em relação às regiões e às culturas em que o sistema é implantado.

A Tabela 1 apresenta a listagem dos emissores que foram utilizados na pesquisa, com suas características técnicas e a vazão mais comercializada no mercado nacional.

Entre os emissores selecionados estão diferentes modelos de emissores autocompensantes, planos, cilíndricos, inseridos e moldados, abrangendo dessa forma uma amostra representativa dos emissores autocompensantes existentes no comércio com fabricantes oriundos de diferentes países (Espanha, Israel, Grécia, EUA e Brasil).

Os espaçamentos dos emissores na linha gotejadora, bem como as vazões e diâmetros de tubulação foram adotados conforme a recomendação técnica. Não sendo feito, no entanto, a separação dos gotejadores para o ensaio na bancada, evitando assim, diferenças relacionadas à influência de emendas e da proximidade dos emissores, adotando assim condições semelhantes a dos irrigantes. Resende (1999) sugere o mesmo, pois a manutenção original do espaçamento de fábrica contribui para reduzir erros e representar melhor a condição real para sistemas de irrigação.

Como os emissores ensaiados são produtos comerciais, os dados e análises aqui apresentadas foram codificados para evitar qualquer tipo de especulação comercial dos resultados apresentados, uma vez que os ensaios conduzidos não são normatizados. As letras utilizadas na codificação dos modelos de emissores (A, B, C, ..., N), não têm nenhuma relação com os nomes comerciais apresentados na Tabela 1 e nem com a seqüência dos mesmos.

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, com utilização dos testes “F” para análise de variância e Tuckey, a 5% de significância, para

comparação de médias e análise de regressão. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa SAS (1999), pelo procedimento GLM (Modelo Linear Generalizado). A análise de regressão foi feita para as variáveis que apresentaram diferença significativa a 5%. A repetição foi dada pelo número mínimo de gotejadores presentes na linha gotejadora (10), e não pelo número de linhas.

Tabela 1. Características técnicas dos modelos com fluxo autocompensante, vazões, diâmetro nominal (\emptyset N), pressão de serviço, forma do labirinto, forma do emissor, membrana de compensação, utilizados na pesquisa

Fabricante	Modelo	Vazão L h ⁻¹	\emptyset N mm	Pressão de serviço kPa	Forma do labirinto		Forma do emissor			Membrana de compensação de pressão		
					Curto e tortuoso	Longo e tortuoso	Plano	Cilíndrico	Circular	Retangular	Circular	Outra
Irrimon	Irridrip	2,5	16	100 – 350		X		X				X
Carborundum	Carbodrip PC	2,3	16	100 – 400		X		X				X
Netafim	Uniram	1,6	17	50 – 400	X		X			X		
Naan	Naan PC	3,8	16	100 – 350		X		X		X		
Plastro	Hydro PCND	2,35	16	80 – 350		X		X				X
Netafim	Ram	2,3	17	50 – 400	X		X			X		
Drip In	Drip In PC	2,4	16	100 – 350		X		X				X
Naan	Naan PC	2,1	16	100 – 350		X		X		X		
Netafim	Ram	1,6	16	50 – 400	X		X			X		
Irrimon	Twin Plus	1,8	17,5	100 – 350	X		X					X
Plastro	Hydro PC	2,2	16	80 – 350		X		X				X
Netafim	Dripnet PC	1,6	17	50 – 400	X		X			X		
Plastro	Hydro PC	2,0	17	80 – 350		X		X				X
Irrimon	Vip Line	3,6	16	100 – 350	X					X		X

Fonte: Catálogos dos fabricantes.

A água utilizada nos ensaios foi proveniente da estação de tratamento de água da ESALQ/USP - Piracicaba, SP. A água, após passar através dos gotejadores, era recolhida por um sistema de calhas que a reconduzia ao tanque de captação, constituindo, assim, um sistema de recirculação de água.

Utilizou-se um filtro de disco de 100 mesh para a retirada de partículas sólidas que porventura entravam no sistema. Acoplou-se um registro de 2' na linha principal e um registro de ¾' na entrada de cada nível. As linhas gotejadoras foram unidas no início e ao final por registros de ½' e conexões de PVC, sustentadas por dispositivos em estrutura metálica que permitiam manter o espaçamento entre as linhas na vertical igual a 0,15 m e na horizontal igual a 0,095 m.

O sistema motobomba utilizado nos ensaios foi composto por duas bombas centrífugas marca KSB, modelos Megabloc 32-160.1R (utilizada para aplicação de água em todo o sistema e limpeza das linhas laterais) e Hydrobloc C 1000 (aplicação do tratamento químico). A operacionalização do funcionamento da bancada, quanto ao horário de início e de parada, foi efetuada manualmente, obedecendo rigorosamente os horários de aplicação e leitura.

À entrada de cada nível do térreo da bancada, foi instalada uma tomada de pressão, permitindo o ajuste da pressão a cada medição de vazão, e se necessário, ajustada àquela preestabelecida. Para a medição da pressão de serviço, à entrada da linha de emissores, foi utilizado um manômetro de Bourdon com faixa de leitura de 0 – 700 kPa.

Primeiramente foi realizada uma irrigação de 36 horas com os 14 modelos de gotejadores autocompensantes descritos na Tabela 1, para adequar o funcionamento da membrana de compensação de pressão antes de se iniciar o ensaio e também uma leitura de vazão de cada gotejador em cada uma das linhas a temperatura ambiente (25°C) e pressão de 200 kPa, para verificação do funcionamento dos gotejadores.

A aplicação foi realizada num intervalo de 24 h, sendo preparada uma calda num volume de água de 400 L (reservatório – tratamento). Após o início da aplicação da calda, a pressão era aferida para 200 kPa, sendo medida também a temperatura e o pH da solução para o monitoramento adequado do ensaio. Para a manutenção do pH na faixa de 5,5 a 6,0 utilizou-se ácido fosfórico 85% P.A.

Uma vez por semana foi realizada uma leitura individual dos gotejadores em cada uma das 14 linhas gotejadoras. O procedimento para as leituras de vazão de cada gotejador consistiu da pressurização do sistema (200 kPa), posicionamento de recipientes plásticos (com dimensões adequadas para receber um volume de até 1L) sob os respectivos gotejadores. Para apoiar os recipientes (coletores) junto aos gotejadores, foram utilizadas placas de madeira (25 x 15 cm²) apoiadas sobre a calha.

O procedimento para leitura, consistiu do posicionamento dos recipientes sob os respectivos gotejadores com uma defasagem de cinco segundos, retirada sequencial dos recipientes após dez minutos com defasagem de cinco segundos, transporte dos mesmos à bancada de pesagem, pesagem e tabulação dos dados.

Para se obter maior exatidão foi utilizado o método gravimétrico para a determinação do volume coletado de cada emissor, expressando-se os valores de vazão em L h⁻¹. Foi utilizada uma balança de precisão certificada (OHAUS) com precisão de 0,01 g. Cada recipiente com água foi pesado; descontando-se sua tara e dividido pelo peso específico da água, para obtenção em volume.

Periodicamente, antes da leitura de vazão dos gotejadores em cada linha lateral, procedeu-se a limpeza das linhas com água da estação de tratamento da ESALQ/USP. Uma adaptação no tubo de 100 mm conectado ao fundo da calha permitia descartar em um canal dentro do Laboratório de Irrigação, a água utilizada para a limpeza.

Diariamente foi feita a medida da temperatura e o pH da solução para o monitoramento adequado do ensaio. A temperatura da água variou de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante o ensaio.

Depois de tabulados os pesos, efetuaram-se os cálculos da vazão, pela eq. (1).

$$q = \frac{P}{1000 t \gamma} 60 \quad (1)$$

em que:

q – vazão do gotejador novo (primeira leitura) ou usado, L h^{-1} ;

P – peso da água coletada, g;

t – tempo de coleta, min; e

γ – peso específico da água, N m^{-3} ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

A distribuição empírica foi utilizada para calcular a distribuição percentual do número de gotejadores para diferentes faixas de redução de vazão. Inicialmente, elaborou-se uma rotina para a divisão em classes de redução de vazão, de acordo com o total de gotejadores para cada modelo estudado.

Cálculos estequiométricos foram realizados para a determinação da dosagem de cloro livre a ser utilizada, sendo que para efeito de monitoramento, amostras de água ao final das laterais foram coletadas para determinar o teor de cloro livre, utilizando-se kits de medição usados no tratamento de piscinas, com a necessária diluição para atingir a faixa de leitura do kit, a qual é de 1 a 5 mg L^{-1} .

Para o cálculo da dosagem de ácido fosfórico 85% P.A. utilizada para manter o pH na faixa de 5,5 a 6,0, foi feita uma curva de titulação.

Durante o período de ensaio, a cada três dias a água do reservatório (tratamento) foi substituída e uma nova solução preparada para evitar perdas quanto ao teor de 100 mg L^{-1} de cloro livre presente na solução.

Com o intuito de verificar a ação direta do cloro na membrana de compensação retiraram-se seis exemplares das mesmas para cada um dos 14 modelos de gotejadores utilizados nos ensaios. A única exceção quanto ao número de exemplares utilizados para o ensaio, foi para o modelo I, o qual utilizou-se dez exemplares, devido à membrana do mesmo ser muito pequena, podendo mascarar a leitura no equipamento (picnômetro) utilizado para a medida do volume das membranas.

As membranas dos diferentes modelos de gotejadores foram mantidas imersas em uma solução de 100 mg L^{-1} de cloro livre utilizando hipoclorito de sódio (12%), com pH mantido na faixa de 5,5 a 6,0 pelo uso de ácido fosfórico, no reservatório (Tratamento).

O procedimento utilizado para a verificação de possíveis danos causados à membrana de compensação de gotejadores foi o seguinte:

- a) Procedeu-se a identificação das membranas semelhantes que eram utilizadas em modelos de gotejadores do mesmo fabricante, e que apresentavam apenas vazões e espaçamento entre gotejadores diferentes (Tabela 2).

- b) Mediu-se o volume de cada seis exemplares de membranas novas em três picnômetros diferentes (três repetições) e calibrados para volume padrão de 50 mL.

Tabela 2. Códigos utilizados para identificação das membranas de compensação, conforme as semelhanças apresentadas entre os modelos avaliados

Código	Modelos
MC1	F, J e K
MC2	G
MC3	L
MC4	I
MC5	B e C
MC6	H e M
MC7	D e E
MC8	A
MC9	N

A medição do volume seguiu o seguinte procedimento: a) Pesagem do picnômetro + tampa (Padrão 1); b) Pesagem do picnômetro + tampa + água (Padrão 2); c) Pesagem dos exemplares de cada modelo de membrana (Padrão 3); d) Pesagem do picnômetro + tampa + água + membrana (Padrão 4); e) Pesagem da água (PH₂O): Padrão 2 – Padrão 1 (Obs.: O peso da água é igual ao volume de água para densidade 1); f) Pesagem da água para completar o Picnômetro com a membrana (PHM): Padrão 4 – Padrão 3 – Padrão 2; g) Volume da Membrana (VM): (PH₂O) - (PHM); e h) Medição da temperatura da água utilizada no ensaio.

Antes do início de cada avaliação, a água utilizada no ensaio era fervida a fogo brando e resfriada a temperatura ambiente até atingir valores próximos de 25°C (a faixa de temperatura utilizada foi de 25°C ± 1 °C). Posteriormente era colocada na câmara de vácuo por 3 minutos para retirada de possíveis bolhas de ar, e somente depois a água era despejada dentro do picnômetro.

Após cada procedimento de medição de volume, as membranas eram inseridas em uma rede e imersas na solução de 100 mg L⁻¹ de cloro livre no reservatório (tratamento), sendo que as leituras de alteração de volume das membranas foram realizadas semanalmente. Durante todos os ensaios o reservatório foi mantido coberto por uma lona para evitar perda da solução por evaporação, ou contaminação.

Para o procedimento de pesagem das membranas, utilizou-se uma balança de precisão (modelo SCIENTECH AS 210) com quatro casas decimais com faixa de leitura de 0,0001g a 210 g.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Do ponto de vista prático, a vazão média de emissores pode ser considerada um bom parâmetro para avaliar alterações quanto ao funcionamento adequado de emissores, seja devido a problemas de entupimento (Cararo et al., 2006; Cordeiro, 2002) ou danos à estrutura interna do emissor por ação química (Koegelenberg & Reinders, 2002; Schischa et al, 1997; Souza et al., 2006).

Com exceção dos modelos E e I os demais modelos apresentaram desempenho satisfatório, pois praticamente não variaram a vazão com 2688 h de funcionamento. Os modelos A e N foram ensaiados num tempo menor (1512 h), devido ter sido adquiridos após o início do experimento (Tabela 3).

Observa-se pela Tabela 3 que o modelo E, apresentou um desempenho adequado até 1512 h, sendo que após este período ocorreu um declínio na vazão, chegando a um valor próximo de $0,2 \text{ L h}^{-1}$, o que corresponde numa redução de 65% na vazão neste período, sendo que no período anterior a redução foi de 23%.

O modelo I apresentou um bom desempenho somente até 1008 h de funcionamento. A partir de 1008 h ocorreu um declínio acentuado, atingindo valor próximo de zero já com 1512 h de funcionamento.

Observa-se pela Tabela 3 descrita anteriormente, que a vazão média para os diferentes modelos de gotejadores diferiu estatisticamente a 5% de significância pelo teste de Tukey ao longo do tempo, mostrando que a ação direta do cloro sobre a membrana de compensação, pode contribuir para a redução de vazão, concordando com Souza et al. (2006).

A análise de regressão foi significativa a 5% para cada modelo de gotejador ensaiado, com exceção dos modelos M e N, ou seja, ocorreu ao longo do tempo redução da vazão, devido à ação do cloro sobre a membrana, concordando com Schischa et al. (1997) que relata em seus estudos que o uso de uma alta dosagem de cloro, pode afetar a regulagem da membrana, comprometendo todo o funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento.

Conforme trabalhos desenvolvidos por Pizarro (1996) e Boman & Ontermma (1994) quanto menor o diâmetro do orifício de passagem de água, maior será a suscetibilidade de ocorrência de entupimento por causas diversas. Nesse aspecto, a observação dos dados de redução de vazão, em relação ao diâmetro de orifício de passagem de água para o modelo E em relação ao modelo D, não apresenta boa correlação. O modelo D (vazão nominal = $1,57 \text{ L h}^{-1}$) diferencia do modelo E (vazão nominal = $2,20 \text{ L h}^{-1}$) apenas por apresentar menor vazão, devido um menor diâmetro de orifício, sendo que o modelo D não apresentou as mesmas características de entupimento ocorridas com o modelo E, que apresentou para o mesmo período de ensaio uma redução de 88% na vazão em comparação ao modelo D que apresentou redução de 27% na vazão. Provavelmente isto ocorreu devido o modelo D apresentar menor área para o assentamento da membrana de compensação sob o labirinto e o orifício de passagem de água.

Desta forma, torna-se importante observar outros aspectos (assentamento da membrana sobre o orifício e o labirinto, resistência do material elastomérico, volume de solução ao qual foi exposto o emissor) que possam contribuir juntamente com o diâmetro do orifício de passagem de água para causar o entupimento.

A ocorrência de entupimento em emissores pode se dar em três situações: no orifício de entrada, no caminho percorrido pela água no emissor e no orifício de saída. No caso de gotejadores autocompensantes, a ocorrência de entupimento, pode ser devida também a danos químicos (ação do cloro) à estrutura da membrana de compensação, que reduz a passagem da água no orifício de saída, devido o aumento de volume da mesma.

Tabela 3. Vazão média (q_m), expresso em $L h^{-1}$ dos gotejadores avaliados, no período do ensaio, utilizando a coleta individual da vazão dos gotejadores, para os modelos A a N e testes de média, respectivamente

horas	Modelos														Média
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
0	1,55 ^{ab}	3,80 ^{ab}	2,01 ^{ab}	1,57 ^a	2,20 ^a	2,19 ^a	2,98 ^a	2,70 ^a	1,81 ^a	2,00 ^a	2,04 ^a	2,35 ^a	2,27 ^{abc}	1,63 ^a	2,22 ^a
168	1,56 ^a	3,88 ^a	1,98 ^{abc}	1,52 ^{ab}	2,04 ^{ab}	2,14 ^{ab}	2,73 ^{ab}	2,66 ^{ab}	1,72 ^{ab}	1,92 ^{ab}	1,97 ^{ab}	2,34 ^a	2,36 ^{ab}	1,62 ^a	2,18 ^{ab}
336	1,50 ^{abc}	3,70 ^{abc}	2,04 ^a	1,41 ^{abc}	1,85 ^{abc}	2,08 ^{abc}	2,69 ^{ab}	2,64 ^{abc}	1,51 ^{bc}	1,89 ^{abc}	1,93 ^{ab}	2,21 ^b	2,27 ^{abc}	1,64 ^a	2,10 ^{bc}
504	1,41 ^c	3,73 ^{abc}	1,94 ^{abc}	1,40 ^{abc}	1,81 ^{bcd}	2,02 ^{bcd}	2,66 ^{ab}	2,60 ^{abc}	1,42 ^c	1,85 ^{bcd}	1,84 ^{bcd}	2,19 ^b	2,22 ^{bc}	1,64 ^a	2,05 ^{cd}
672	1,41 ^c	3,73 ^{abc}	1,95 ^{abc}	1,34 ^{bcd}	1,77 ^{bcd}	1,97 ^{cde}	2,65 ^{ab}	2,60 ^{abc}	1,38 ^c	1,82 ^{bcd}	1,87 ^{bc}	2,19 ^b	2,25 ^{abc}	1,64 ^a	2,04 ^{cde}
840	1,48 ^{abc}	3,61 ^{bc}	1,92 ^{abcd}	1,33 ^{bcd}	1,76 ^{bcd}	1,94 ^{cde}	2,57 ^{ab}	2,58 ^{abcd}	1,36 ^c	1,79 ^{bcd}	1,77 ^{cde}	2,11 ^{bcd}	2,23 ^{abc}	1,64 ^a	2,01 ^{cdef}
1008	1,41 ^c	3,56 ^{bc}	1,86 ^{cd}	1,29 ^{cd}	1,67 ^{cde}	1,93 ^{de}	2,63 ^{ab}	2,53 ^{abcd}	1,29 ^c	1,76 ^{cde}	1,75 ^{cde}	2,04 ^{cde}	2,11 ^c	1,62 ^a	1,96 ^{defg}
1176	1,44 ^c	3,73 ^{abc}	1,87 ^{abc}	1,41 ^{abc}	1,74 ^{bcd}	1,94 ^{cde}	2,67 ^{ab}	2,57 ^{abcd}	0,86 ^d	1,76 ^{cde}	1,71 ^{de}	2,13 ^{bc}	2,23 ^{bc}	1,60 ^a	1,98 ^{defg}
1344	1,40 ^c	3,82 ^{ab}	1,99 ^{abc}	1,31 ^{bcd}	1,72 ^{bcd}	1,96 ^{cde}	2,70 ^{ab}	2,53 ^{abcd}	0,33 ^e	1,76 ^{cde}	1,76 ^{cde}	2,02 ^{def}	2,23 ^{bc}	1,60 ^a	1,93 ^{efg}
1512	1,45 ^{bc}	3,76 ^{abc}	2,00 ^{abc}	1,34 ^{abc}	1,71 ^{cde}	1,91 ^{de}	2,69 ^{ab}	2,55 ^{abcd}	0,14 ^{ef}	1,79 ^{bcd}	1,77 ^{cde}	2,01 ^{def}	2,27 ^{abc}	1,57 ^a	1,92 ^{efgh}
1680		3,49 ^c	1,81 ^d	1,22 ^{cd}	1,48 ^{def}	1,84 ^e	2,56 ^{ab}	2,42 ^d	0,05 ^{ef}	1,73 ^{de}	1,70 ^{de}	1,99 ^{ef}	2,23 ^{bc}		1,88 ^{ghi}
1848		3,49 ^c	1,81 ^d	1,22 ^{cd}	1,48 ^{def}	1,84 ^e	2,56 ^{ab}	2,42 ^d	0,05 ^{ef}	1,73 ^{de}	1,70 ^{de}	1,99 ^{ef}	2,23 ^{bc}		1,88 ^{ghi}
2016		3,70 ^{abc}	1,89 ^{bcd}	1,26 ^{cd}	1,39 ^{efg}	1,94 ^{cde}	2,63 ^{ab}	2,50 ^{bcd}	0,00 ^f	1,77 ^{cde}	1,73 ^{cde}	1,94 ^{ef}	2,21 ^{bc}		1,91 ^{fgh}
2184		3,59 ^{bc}	1,94 ^{abcd}	1,19 ^{cd}	1,31 ^{fg}	1,91 ^{de}	2,65 ^{ab}	2,48 ^{cd}	0,00 ^f	1,73 ^{de}	1,64 ^e	1,90 ^f	2,24 ^{bc}		1,88 ^{ghi}
2352		3,70 ^{abc}	2,03 ^{abc}	1,34 ^{abc}	1,15 ^g	1,99 ^{cd}	2,58 ^{ab}	2,58 ^{abcd}	0,00 ^f	1,72 ^{de}	1,64 ^e	1,92 ^f	2,24 ^{bc}		1,90 ^{gh}
2520		3,58 ^{bc}	1,91 ^{bcd}	1,19 ^{cd}	0,69 ^h	2,00 ^{bcd}	2,39 ^b	2,53 ^{abcd}	0,00 ^f	1,69 ^e	1,64 ^e	1,89 ^f	2,40 ^a		1,82 ^{hi}
2688		3,54 ^{bc}	1,99 ^{abc}	1,14 ^d	0,28 ⁱ	1,92 ^{cde}	2,32 ^b	2,56 ^{abcd}	0,00 ^f	1,72 ^{de}	1,68 ^{de}	1,90 ^f	2,29 ^{ab}		1,77 ⁱ

* Média com a mesma letra minúscula na coluna não indica diferença significativa pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

As Figuras 2 a 15 mostram, para os diferentes tipos de emissores e o tempo de operação do sistema avaliado, a distribuição percentual do número de emissores para diferentes faixas de redução de vazão. Uma vez que manteve a vazão média praticamente constante durante todo o ensaio e atingindo no máximo 10% de redução de vazão. O modelo C (Figura 4) mostrou o melhor desempenho no decorrer do experimento, tendo 85% do total dos emissores não apresentando redução de vazão e os 15% restantes, redução de 10%. O modelo E (Figura 6) apresentou com 2688 h 80% do total de gotejadores com 100% de redução de vazão, sendo o restante (20%) dividido em 5% do total de gotejadores para as faixas de 40, 50, 60 e 90% de redução de vazão.

O modelo I (Figura 10) apresentou com 1512 h 75% do total de gotejadores com 100% de redução de vazão, em torno de 18% do total de gotejadores com 90% de redução e 7% do total de gotejadores com 70% de redução de vazão. A partir daí, com o acréscimo do número de horas de aplicação, 100% do total de gotejadores apresentaram 100% de redução.

O padrão de distribuição do nível de entupimento para os demais modelos não superou 50% do total de gotejadores com redução de vazão na faixa de 30%, permitindo observar que o entupimento não foi muito acentuado, no decorrer do ensaio.

Alguns modelos ensaiados possuem mecanismo de autolimpeza, que conforme dados de catálogo dos fabricantes, baseia-se no equilíbrio de pressões, nas áreas superior e inferior do diafragma. Esse equilíbrio faz com que o diafragma flutue, expulsando as partículas que se acumularam, evitando, assim, entupimentos por causa biológica ou por precipitação química de Fe (RESENDE, 1999). Deve-se observar que este mecanismo de autolimpeza permite um maior contato do diafragma com a solução de cloro utilizada para tratamento químico da água (100 mg L⁻¹ de cloro livre com pH na faixa de 5,5 a 6,0), podendo, assim, favorecer danos à superfície do diafragma que afetarão o seu funcionamento (regulagem de pressão), ocasionando redução de vazão.

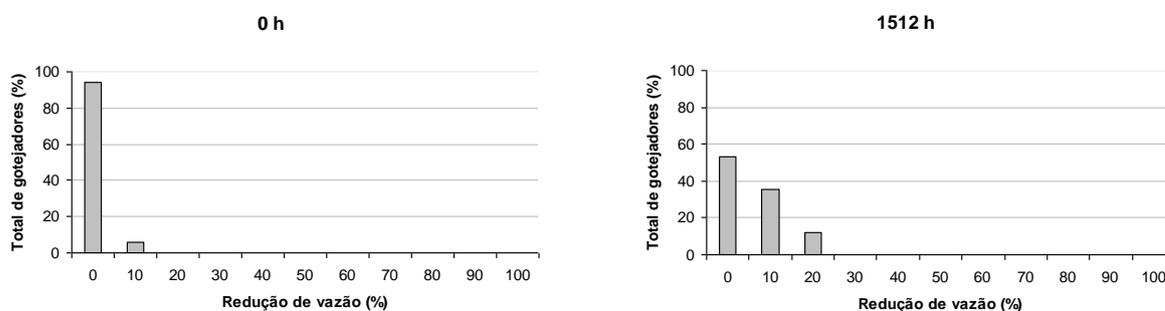


Figura 2. Percentual do número total de gotejadores (n = 17) por faixa de redução de vazão, para o modelo A, no período do ensaio.

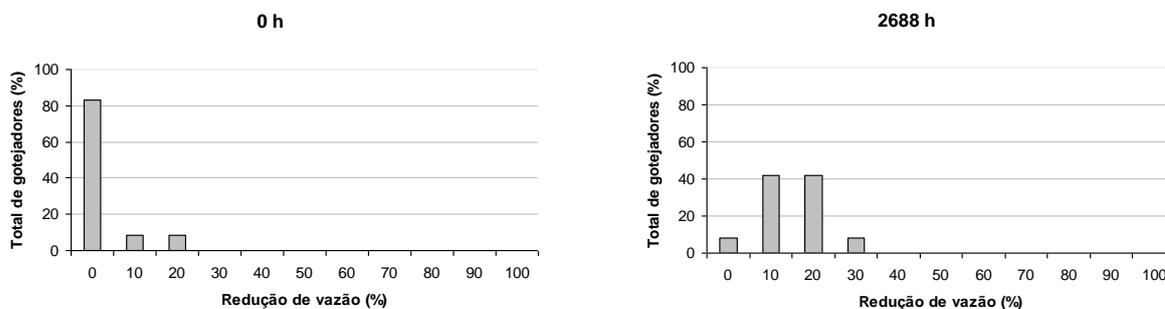


Figura 3. Percentual do número total de gotejadores (n = 12) por faixa de redução de vazão, para o modelo B, no período do ensaio

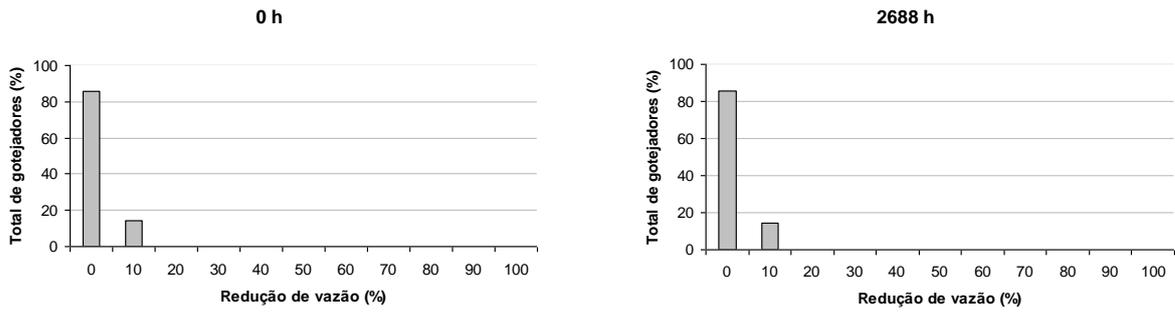


Figura 4. Percentual do número total de gotejadores (n = 14) por faixa de redução de vazão, para o modelo C, no período do ensaio.

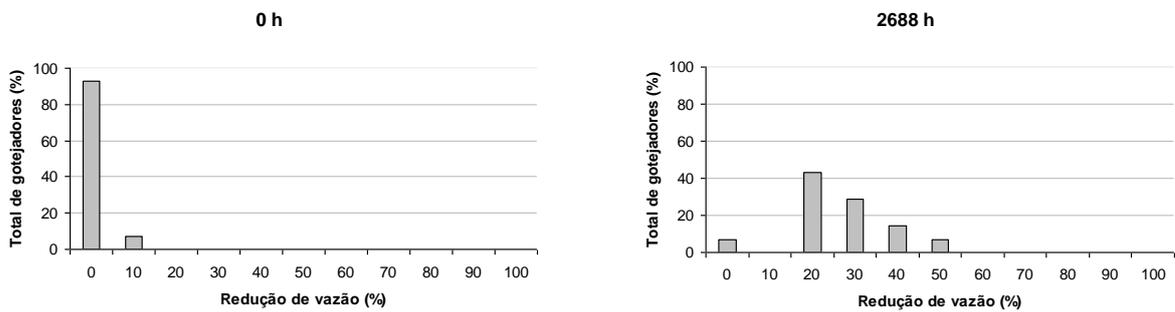


Figura 5. Percentual do número total de gotejadores (n = 14) por faixa de redução de vazão, para o modelo D, no período do ensaio.

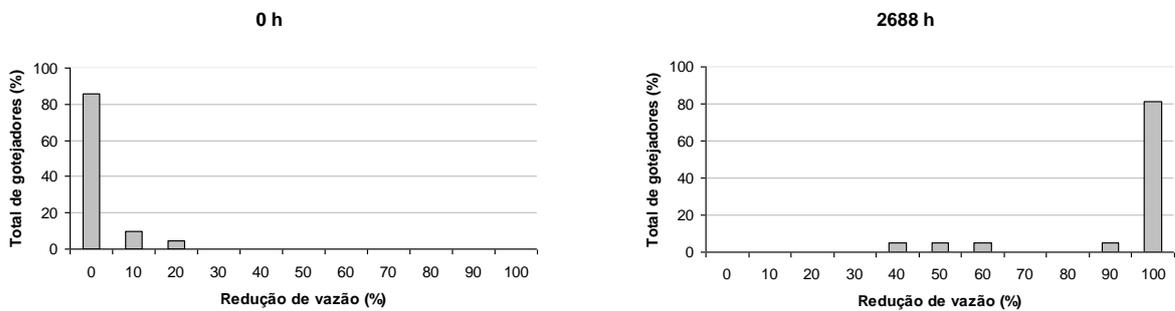


Figura 6. Percentual do número total de gotejadores (n = 21) por faixa de redução de vazão, para o modelo E, no período do ensaio.

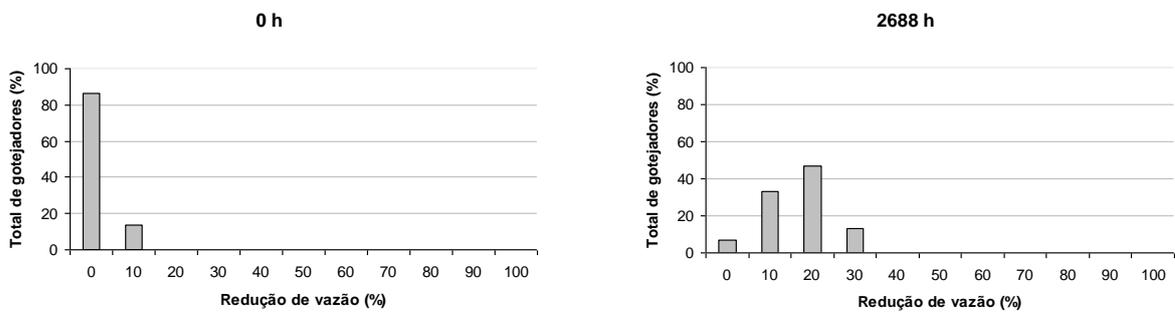


Figura 7. Percentual do número total de gotejadores (n = 15) por faixa de redução de vazão, para o modelo F, no período do ensaio

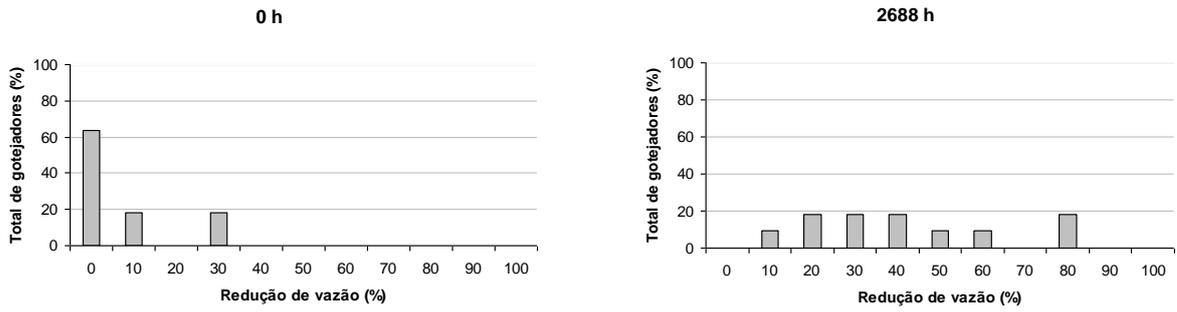


Figura 8. Percentual do número total de gotejadores (n = 11) por faixa de redução de vazão, para o modelo G, no período do ensaio

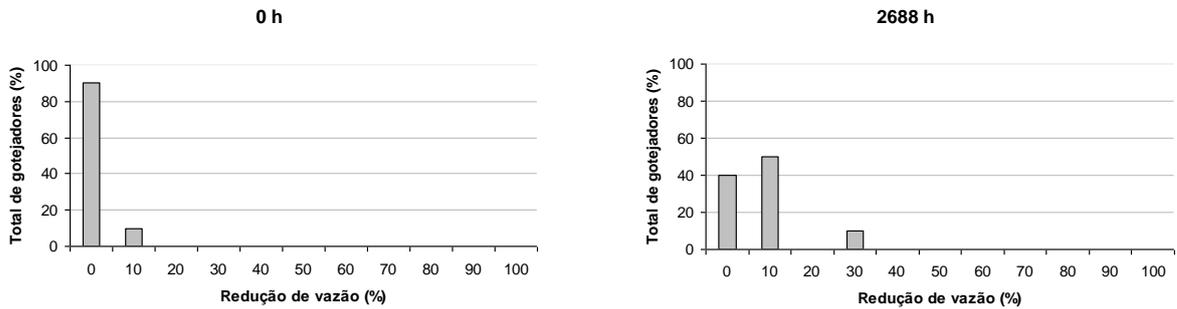


Figura 9. Percentual do número total de gotejadores (n = 10) por faixa de redução de vazão, para o modelo H, no período do ensaio

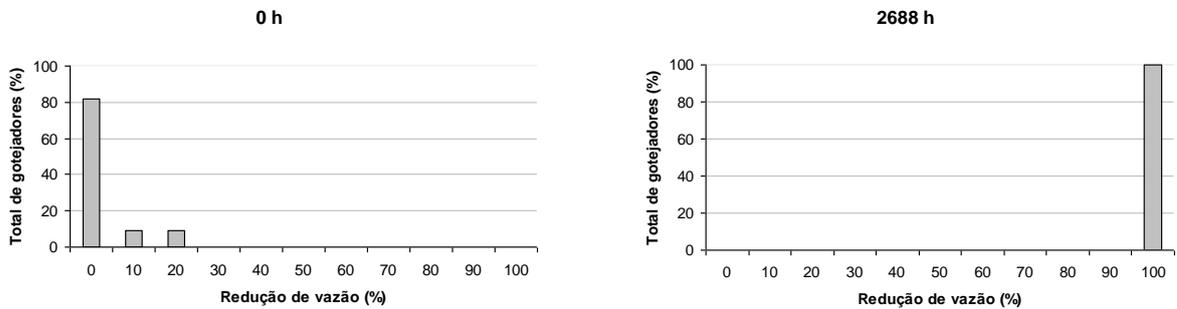


Figura 10. Percentual do número total de gotejadores (n = 11) por faixa de redução de vazão, para o modelo I, no período do ensaio

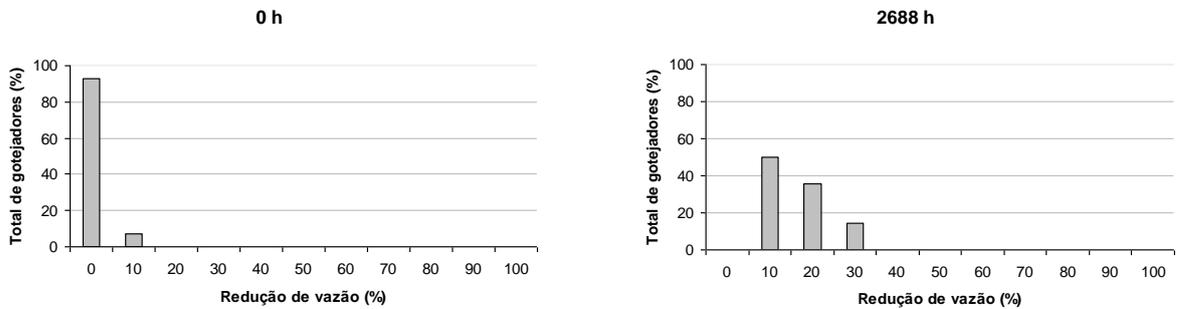


Figura 11. Percentual do número total de gotejadores (n = 14) por faixa de redução de vazão, para o modelo J, no período do ensaio

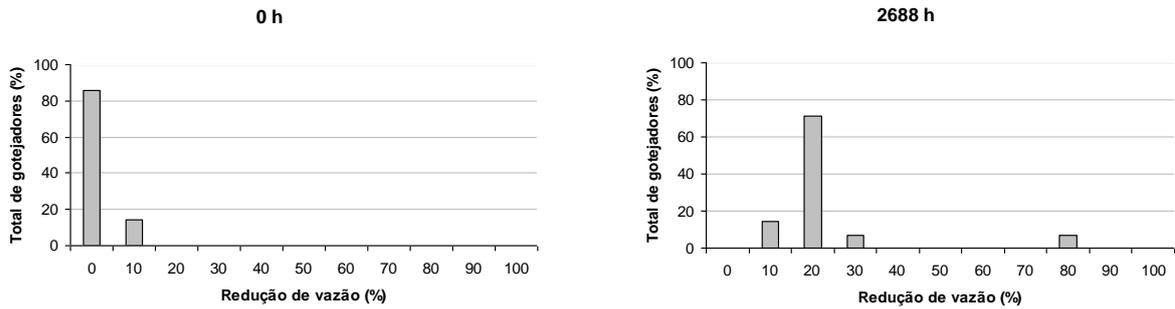


Figura 12. Percentual do número total de gotejadores (n = 14) por faixa de redução de vazão, para o modelo K, no período do ensaio

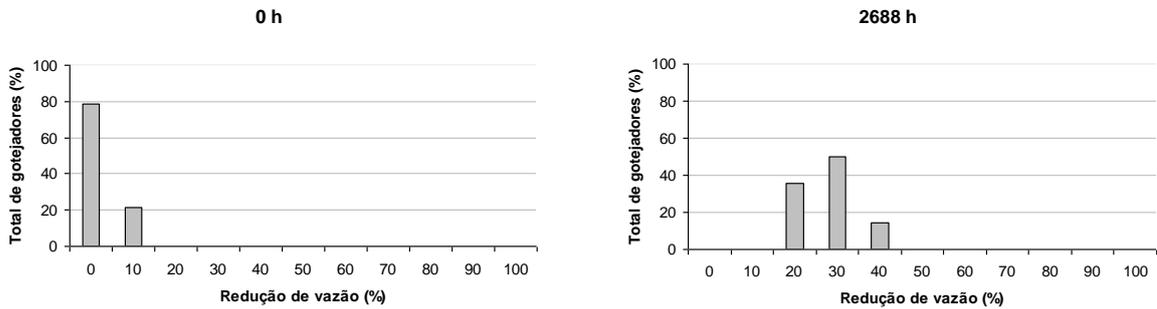


Figura 13. Percentual do número total de gotejadores (n = 14) por faixa de redução de vazão, para o modelo L, no período do ensaio

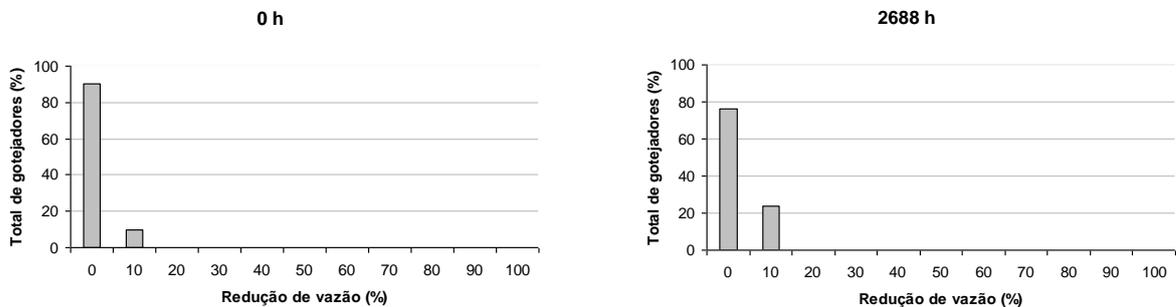


Figura 14. Percentual do número total de gotejadores (n = 21) por faixa de redução de vazão, para o modelo M, no período do ensaio

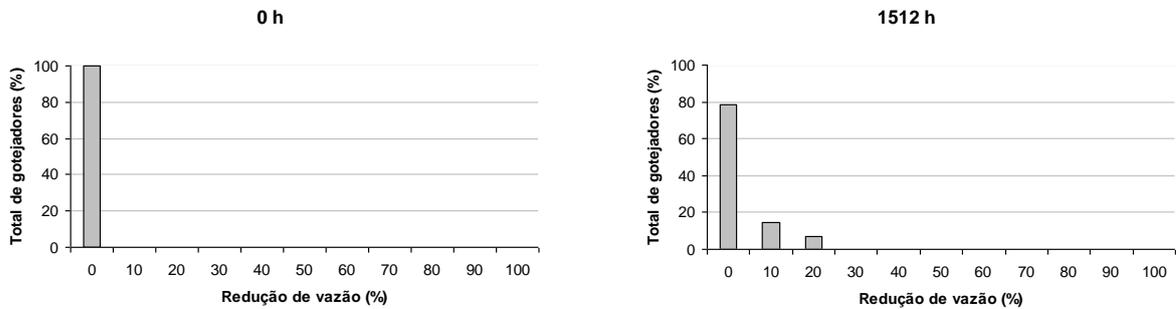


Figura 15. Percentual do número total de gotejadores (n = 14) por faixa de redução de vazão, para o modelo N, no período do ensaio

A Tabela 4 mostra as características dos gotejadores e suas membranas de compensação que podem contribuir para a ocorrência de entupimento.

Observa-se pela Tabela 4 que o tempo de contato da membrana de compensação com a solução de cloro contribuiu para um aumento significativo do volume da membrana do modelo I (aumento de 112% em relação ao volume inicial), seguido do modelo D e E (aumento de 13% em relação ao volume inicial), sendo que o restante das membranas apresentaram aumento de volume inferior a 8%.

Já a comparação das médias, mostrou que o modelo I diferiu estatisticamente a 5% de significância pelo teste de LSM (Least Squares Means) dos demais modelos de membrana de compensação. O teste de Tukey foi muito rigoroso e não conseguiu diferenciar as médias entre os modelos de membranas de compensação estudados, isto porque foram obtidos muitos valores de volume igual à zero ao longo do experimento. Desta forma, optou-se pelo uso do teste de LSM.

Observa-se que para o caso dos modelos E e I, as maiores reduções de vazão, ocorreram na fase inicial do experimento até 1680 h para o modelo E e 1008 h para o modelo I, pois a partir daí o dano químico já estava inserido e o acúmulo de horas de exposição dos gotejadores à solução de 100 mg L⁻¹ de cloro livre, apenas contribuiu para agravar o entupimento.

O modelo E reduziu em 33% a vazão com 1680 h de funcionamento, sendo exposto a um volume de solução total igual a 3070,86 L e volume médio semanal até este período igual a 287,00 L, sendo que após este período o volume de solução aplicado semanalmente reduziu gradativamente de 250,00 L até 115,00 L com 2688 h de funcionamento.

O modelo I reduziu em 29% a vazão com 1008 h de funcionamento, com volume de solução total igual a 1544,74 L e volume médio semanal até este período igual a 229 L.

Observa-se pela Tabela 4 que a análise isolada da vazão média referente à primeira leitura (VM_i) e do volume de solução de cloro (VS_{cloro}) aplicado durante o ensaio, não são fatores que explicam adequadamente a redução de vazão mostrada pelos dados de vazão média obtidos no final do experimento (VM_f).

O emissor B foi o que permitiu a passagem do maior volume de cloro (VS_{cloro}) durante o ensaio por sua câmara de compensação de pressão (local onde fica inserida a membrana) e orifício do mesmo, isto porque este emissor apresenta a maior vazão média inicial (VM_i) quando comparado aos demais modelos de gotejadores ensaiados, e no entanto, o aumento de volume de membrana (AVM) para este emissor foi igual a zero.

Os emissores D e E apresentaram o mesmo aumento de volume de membrana (AVM) e susceptibilidade do material a danos químicos semelhantes (mesmo modelo de membrana). No entanto, o emissor E apresentou no final do experimento uma redução de vazão média maior que o emissor D, isto porque ocorreu um maior assentamento da membrana de compensação sobre o labirinto e o orifício de saída do emissor E. Com isso, observa-se que a redução de vazão é resultado da ação do cloro sobre o elastômero, sendo que esta ação pode se agravar devido às características técnicas do emissor (geometria e vazão nominal).

É importante observar que ocorreram nos últimos anos, avanços importantes quanto ao desenvolvimento de diferentes materiais poliméricos utilizados por diferentes segmentos industriais, inclusive para a área de irrigação. Permitindo, por exemplo, que os novos emissores tenham suas membranas de compensação constituídas por silicone ou EPDM, ou com constituintes em sua formação que contribuem para aumentar a resistência à ação do cloro (Mano & Mendes, 2004).

Tabela 4. Vazão média inicial (VM_i), vazão média obtida no final do experimento (VM_f), volume de solução de cloro aplicado durante o ensaio (VS_{cloro}), alteração de volume da membrana (AVM) e susceptibilidade do material da membrana (SMM) a danos químicos por cloro (hipoclorito de sódio, 12%)

Modelos	VM_i $L h^{-1}$	VM_f $L h^{-1}$	VS_{cloro} m^3	AVM %	Características		
					SMM		
					alta	média	baixa
A*	1,55	1,45	2,21	0 ^b			X
B	3,80	3,54	9,89	0 ^b			X
C	2,01	1,99	5,20	0 ^b			X
D	1,57	1,14	3,59	13 ^b	X		
E	2,20	0,28	4,33	13 ^b	X		
F	2,19	1,92	5,30	0 ^b			X
G	2,98	2,32	7,11	7 ^b		X	
H	2,70	2,56	6,87	6 ^b		X	
I	1,81	0,00	2,00	112 ^a	X		
J	2,00	1,72	4,82	0 ^b			X
K	2,04	1,68	4,78	0 ^b			X
L	2,35	1,90	5,58	1 ^b			X
M	2,27	2,24	6,05	6 ^b		X	
N*	1,63	1,57	2,46	2 ^b			X

* Média com a mesma letra minúscula na coluna não indica diferença significativa pelo teste LSM (Least Squares Means), a 5% de probabilidade.

** Funcionamento do sistema durante 1512 h para os modelos A e N e 2688 h para os demais modelos.

*** Pressão de serviço igual a 200 kPa e temperatura da água igual a 25 °C.

As Figuras 16 e 17 mostram fotografias dos modelos E e I, retiradas em microscópio eletrônico de varredura (modelo DSM 940 A ZEISS Germany) instalado no Laboratório de microscopia eletrônica NAP/MEPA da ESALQ/USP.

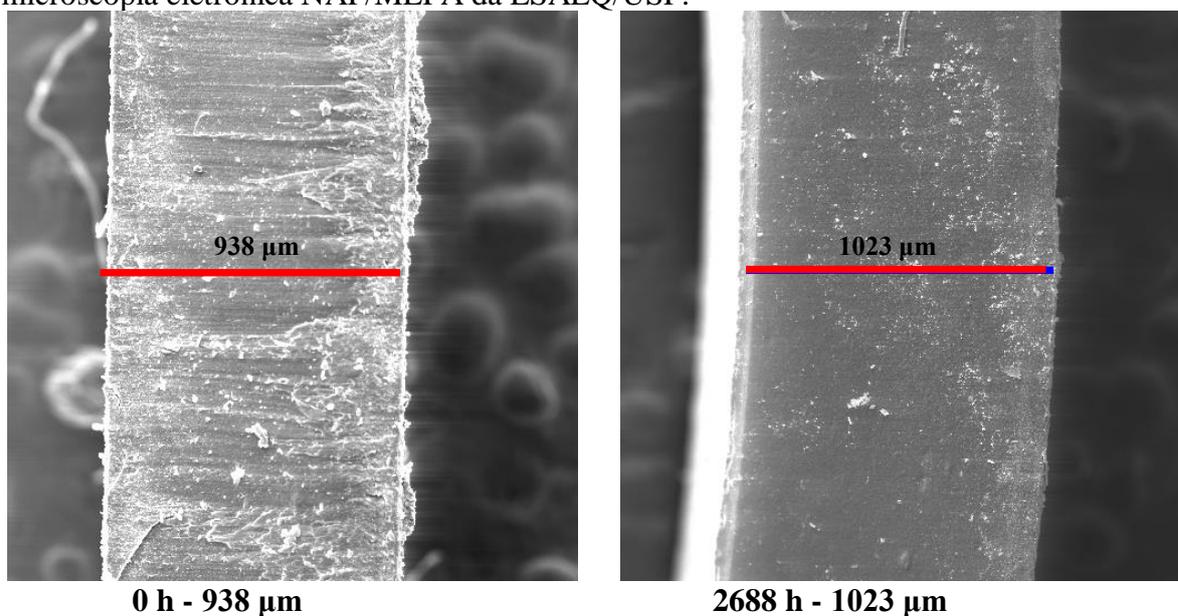


Figura 16 – Variação de espessura das amostras do modelo E (aumento 50x) com 0 h e após 2688 h de aplicação de 100 mg L^{-1} de cloro livre.

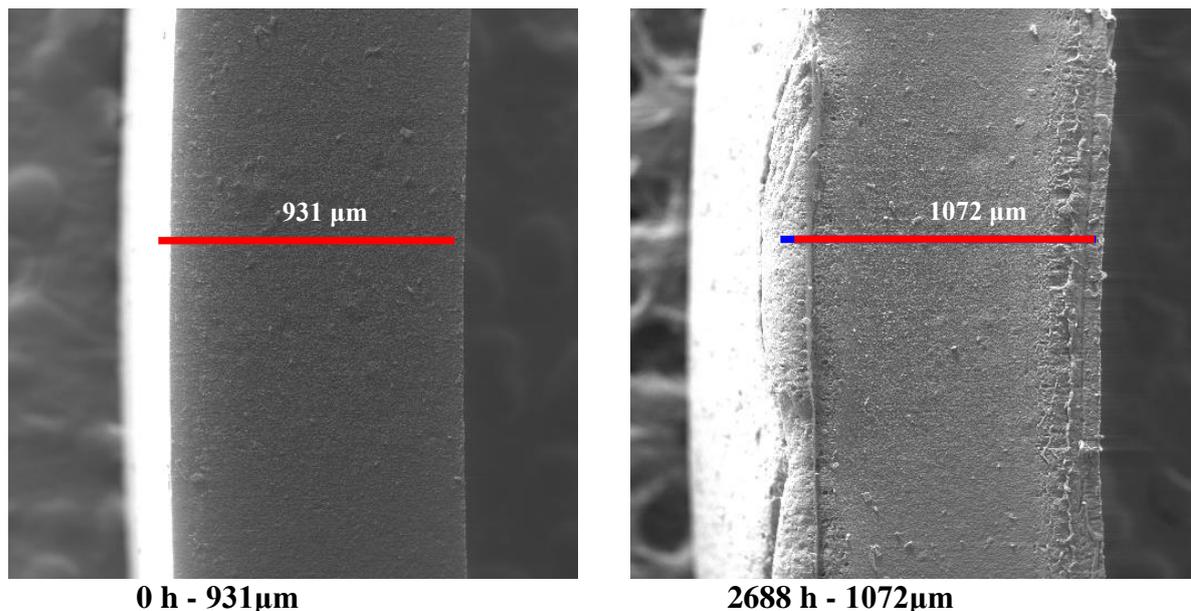


Figura 17. Variação de espessura das amostras do modelo I (aumento 50x) com 0 h e após 2688 h de aplicação de 100 mg L⁻¹ de cloro livre.

O modelo E apresentou $E = 938 \mu\text{m}$ para a membrana de compensação nova (0 h de aplicação de 100 mg L⁻¹ de cloro livre) e $E = 1023 \mu\text{m}$ para a membrana de compensação usada (2688 h de aplicação de 100 mg L⁻¹ de cloro livre). Já o modelo I apresentou $E = 931 \mu\text{m}$ para a membrana de compensação nova e $E = 1072 \mu\text{m}$ para a membrana de compensação usada, sendo todas estas medições realizadas com aumento de 50x.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na condução do ensaio permitiram chegar às seguintes conclusões:

- a. Existem diferenças significativas entre os modelos de gotejadores avaliados, com relação à suscetibilidade da membrana de compensação ao dano químico por cloro, para a dose extrema de 100 mg L⁻¹, podendo classificar os emissores quanto à sensibilidade a ação do cloro como: modelos muito sensíveis (E e I), medianamente sensíveis (D e G), sensíveis (F, J, K e L) e pouco sensíveis (A, B, C, H, M e N);
- b. O efeito do dano químico nas membranas manifesta-se sob forma de expansão do volume das mesmas, o que faz com que a membrana pressione (obstrua) o orifício de saída diminuindo a vazão do emissor.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOMAN, B.; ONTERMAA, E. Citrus microsprinkler clogging: costs, causes, and cures. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, Florida, n. 107, p. 39 – 47, 1994.

CARARO, D. C. et al. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 22, n. 2, p. 251-257, 2006.

CORDEIRO, E. A. **Influência do tratamento de água ferruginosa no desempenho de sistema de irrigação por gotejamento**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

KOEGELENBERG, F.; REINDERS, F. Performance of drip irrigation systems under field conditions. ARC – Institute for Agricultural Engineering, 2002. 14 p. Disponível em: <<http://www.wca-infonet.org/servlet/BinaryDownloaderServlet?filename=Documents/8723.Performanceofdripirrigation.pdf>>. Acesso em: 14 jan 2006.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 191 p.

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

PADMAKUMARI, O.; SIVANAPPAN, R. K. Study on clogging in drip systems. In: INTERNATIONAL DRIP/TRICKLE IRRIGATION CONGRESS, 3, 1985, Fresno. **Proceedings...** St. Joseph: ASAE, 1985. p. 80-83

PITTS, D. J.; HAMAN, D. Z.; SMAJSTRLA, A. G. **Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems**. Fort Pierce: University of Florida, *IFAS*, Florida Cooperative Extension Service, 1990. 12 p. (Bulletin, 258)

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. 3. ed. Madri: Mundi Prensa, 1996. 513 p.

RESENDE, R. S. **Suscetibilidade de gotejadores ao entupimento de causa biológica e avaliação do desentupimento via cloração da água de irrigação**. 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

STATISTICAL ANALYSES SYSTEM. **The SAS system for Windows Version 8.** 5 ed. Cary, 1999. 88 p.

SCHISCHA, A. et al. Drip irrigation with reclaimed effluent - the clogging problems. 'The platform trials' test filters and emitter sensitivity. **International Water and Irrigation Review**, Israel, v. 17, n. 3, p. 8-12, 1997.

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