

ARTIGO TÉCNICO

EFEITO DAS DIMENSÕES DA PLACA DIFUSORA NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UM MODELO COMERCIAL DE FILTRO DE AREIA

FÁBIO P. DE DEUS¹, ROBERTO TESTEZLAF², MARCIO MESQUITA³

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da mudança da forma e das dimensões da placa difusora de um filtro de areia comercial sobre a perda de carga gerada pelo equipamento, quando submetido ao escoamento no sentido de filtração, sob as condições de filtro vazio e na presença da camada filtrante. Comparou-se o comportamento hidráulico da placa difusora original do equipamento com placas do tipo plano, com bordas com diferentes dimensões. Os ensaios foram conduzidos em um módulo experimental construído no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da FEAGRI/UNICAMP, utilizando quatro combinações de dimensões de placa difusora e para taxas de filtração com valores de 40; 60; 80 e 100 m³ h⁻¹ m⁻². Os resultados mostraram que as placas difusoras propostas não modificaram estatisticamente os valores de perda de carga na faixa recomendada de operação de filtros de areia (até 60 m³ m⁻² h⁻¹), mas proporcionaram menores deformações na camada superficial de areia, fato que contribui para a diminuição dos caminhos preferenciais da água, podendo melhorar a eficiência de remoção do equipamento. A pesquisa demonstrou a existência de interação entre o modelo de placa difusora utilizada em filtros de areia e o revolvimento da superfície da camada de areia.

PALAVRAS-CHAVE: irrigação localizada, tratamento da água, entupimento de emissores.

EFFECTS OF DIFFUSER DIMENSIONS ON THE HYDRAULIC PERFORMANCE OF A COMMERCIAL SAND FILTER MODEL

ABSTRACT: The objective of this research was to evaluate the effect of varying the shape and dimensions of the diffuser plate fitted in a commercial sand filter on its head loss when subjected to filtration flow direction, under the conditions of an empty filter and filled with sand. It was compared the hydraulic behavior of the filter original plate diffuser with a designed flat diffuser with edge. The experiments were performed in experimental module assembled at the Hydraulic and Irrigation Laboratory of FEAGRI/UNICAMP, using four different dimensions of proposed diffuser, for filtration rate values of 40, 60, 80 e 100 m³ h⁻¹ m⁻². The results showed that the proposed diffusers did not change statistically the head loss values in the recommended sand filter operation range (up to 60 m³ h⁻¹ m⁻²). However, they caused smaller sand surface layer deformations, fact that contributes to the reduction of preferential paths of water, improving the equipment removal efficiency. The research showed the occurrence of interaction between the diffuser model used in sand filters and the sand surface layer drift.

KEYWORDS: localized irrigation, water treatment, emitters clogging.

INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas de irrigação localizada apresenta-se atualmente como uma alternativa tecnológica para se buscar o aumento da eficiência de aplicação da água e de fertilizantes, assumindo importância econômica e ambiental na atividade agrícola. Entretanto, por empregar emissores com diâmetros reduzidos de distribuição de água e, portanto, suscetíveis ao entupimento, esses sistemas requerem uma qualidade de água superior aos demais sistemas de irrigação. A ocorrência de obstrução desses emissores afeta o desempenho hidráulico do sistema de irrigação,

¹ Doutorando em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas - SP.

² Professor Titular, FEAGRI/UNICAMP, Campinas - SP.

³ Doutorando em Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas - SP.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 14-6-2010

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 26-11-2011

acarretando aumento dos custos operacionais e gerando riscos aos investimentos da atividade (LEMOS FILHO et al., 2011; YURDEM et al., 2008).

Para garantir a qualidade da água requerida na irrigação localizada e reduzir os processos de entupimento dos emissores, o tratamento da água a ser aplicado é considerado um requisito básico para o sucesso do emprego dessa técnica. Dentre os métodos de tratamento disponíveis, a filtração é o mais indicado para a remoção de partículas sólidas em suspensão, sejam orgânicas, sejam inorgânicas (TESTEZLAF, 2008). Entre as opções de equipamentos para a execução da filtração, o filtro de areia destaca-se por apresentar desempenho superior na retenção de partículas orgânicas e de algas, pois possibilita adesão das partículas ao longo da altura da camada filtrante, aumentando o tempo disponível à filtração, quando a limpeza da camada (retrolavagem) for executada de forma eficaz (TESTEZLAF, 2008; CAPRA & SCICOLONE, 2007; DURAN-ROS et al., 2009). Entretanto, a falta de aplicação de critérios técnico-científicos adequados aos projetos de filtros de areia, adicionado ao pouco conhecimento e treinamento dos agricultores irrigantes, determina que os processos de filtragem e retrolavagem apresentem problemas em sua operação, limitando sua eficácia (TESTEZLAF, 2008; SALCEDO et al., 2011).

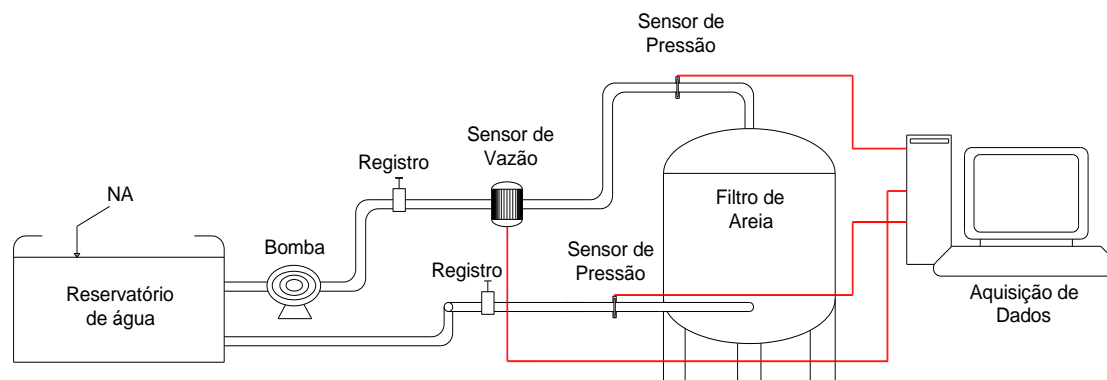
Os filtros de areia possuem duas estruturas internas que precisam ser corretamente projetadas: a placa difusora - responsável por estabelecer uniformidade do afluente na passagem pelo leito filtrante; e as crepinas ou drenos - que conduzem o efluente do filtro para o sistema de irrigação no processo de filtragem e possibilitam a lavagem do leito filtrante (retrolavagem) na situação de inversão de fluxo (MESQUITA, 2010). ARBAT et al. (2011) salientam que as perdas de carga causadas pelas estruturas internas de filtros de areia devem ser minimizadas, sendo a aplicação de critérios de projeto a principal alternativa para propor modificações nos equipamentos. Adicionalmente, MESQUITA et al. (2012 b) salientam que os tipos de componentes internos contribuem diferentemente para o comportamento da variação da perda de carga em função da taxa de filtração durante o processo de filtração, sendo que ARBAT et al. (2011), analisando resultados de simulação utilizando fluidodinâmica computacional, obtiveram que 84,6% da perda de carga total em filtros de areia são originados pela camada de areia, sendo o restante, 15,4%, contribuição das tubulações de entrada e saída (4,4%) e placa difusora e crepinas (11%).

Especificamente com relação à placa difusora, MESQUITA (2010) e BURT (1994) observaram a influência dessa estrutura na orientação das linhas de fluxo do afluente no interior do filtro, podendo direcioná-las às paredes do equipamento, causando a movimentação e o deslocamento das partículas de areia, criando caminhos preferenciais à movimentação da água, podendo alterar o comportamento hidráulico e a eficiência de remoção do equipamento.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da mudança da forma e as dimensões da placa difusora de um filtro de areia comercial sobre a perda de carga gerada pelo equipamento quando submetido ao escoamento no sentido de filtração, sob as condições de filtro vazio e na presença da camada filtrante.

DESCRIÇÃO DO ASSUNTO

O trabalho foi realizado em um módulo experimental instalado a partir de um circuito fechado de tubulações existente no Laboratório de Hidráulica e Irrigação, da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). O módulo era constituído dos seguintes equipamentos: filtro de areia comercial; dois registros de agulha; dois pontos de tomada de pressão do tipo integral, instalados antes e depois do filtro de areia, atendendo à norma ASABE (1994); um sensor eletromagnético de vazão, marca Seginet, modelo 2551, instalado na tubulação de entrada do filtro; transdutores de pressão, da marca Motorola, e modelo MPX 5700DP (Figura 1).



(FONTE: MESQUITA, 2010).

FIGURA 1. Módulo experimental com detalhes da conexão do sistema de aquisição de dados.
Experimental module with connection details of the data acquisition system.

Os sinais correspondentes às variáveis de vazão e de pressão foram coletados por um sistema de aquisição constituído por uma placa de aquisição de dados da marca National Instruments®, gerenciada por uma interface computacional desenvolvida no software Labview® e instalada em um microcomputador de controle.

O modelo de placa difusora proposto era do tipo plano com bordas, que foi comparado ao modelo original com formato plano (Figura 2). O projeto da placa difusora foi baseado nos resultados obtidos por MESQUITA (2010), que observou a influência da presença da borda em placas difusoras, na menor movimentação da superfície da camada filtrante, que pode colaborar para atingir menores valores de perda de carga do equipamento.

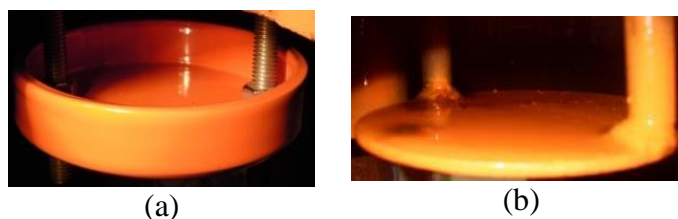


FIGURA 2. Placa difusora tipo plana com bordas (a), e original do equipamento (b). **Diffuser plate, flat with edges (a) and from the original equipment (b).**

Foram avaliadas quatro combinações de dimensões do diâmetro da placa e da altura da borda. Na Tabela 1, apresentam-se as dimensões do modelo de placa difusora proposta e do modelo original do equipamento.

TABELA 1. Dimensões do diâmetro e da altura da borda dos modelos de placa difusora propostos e a original do equipamento. **Dimensions of the diameter and height of the edge of the diffuser plate models proposed and the from the original equipment.**

Placa Difusora ¹	Diâmetro (cm)	Altura da Borda (cm)
D0	10,0	0,0
D1	11,0	1,0
D2	11,0	4,5
D3	14,0	1,0
D4	14,0	4,5

¹D0 - placa difusora original de fábrica; D1, D2, D3 e D4 - placa difusora proposta.

Com o intuito de atender às recomendações de alguns autores, como salientado no trabalho de TESTEZLAF (2008), o ensaio de filtração foi conduzido para os valores de taxa de filtração de 40; 60; 80 e 100 m³ h⁻¹ m⁻². A variação da perda de carga foi determinada a partir de três repetições

para cada valor de taxa de filtração e utilizando água limpa. A duração de cada leitura das variáveis de resposta do ensaio foi de três minutos, registrando valor médio de diferencial de pressão e de vazão a cada segundo, totalizando 180 conjuntos de valores médios. Os dados relativos à perda de carga do modelo de placa difusora original (D0), para as condições de ensaios, foram extraídos do trabalho de MESQUITA et al. (2012 a), que utilizaram as mesmas condições experimentais deste trabalho.

Utilizou-se uma camada de areia com 45 cm de altura, com granulometria variando de 0,5 a 1 mm, diâmetro efetivo de 0,51 mm e coeficiente de uniformidade de 1,5. Para evitar a influência da variação da porosidade do meio filtrante na ocorrência da perda de carga nos testes, procedeu-se ao acondicionamento da areia no interior do filtro, de forma uniforme, operando inicialmente o filtro na maior taxa de filtração do experimento ($100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), por 15 minutos.

Buscando avaliar a interação entre os modelos de placa difusora ensaiadas com a camada de areia presente no interior do filtro, os ensaios foram conduzidos para duas condições de operação do filtro: vazio e na presença da camada filtrante. O ensaio realizado na condição de filtro vazio tinha o objetivo de avaliar a diferença de perda de carga na parte estrutural do filtro (placa difusora e crepinas), comparando-as entre si e em relação à placa difusora original do equipamento. Por outro lado, na avaliação do filtro com camada filtrante, buscou-se analisar o efeito do modelo de placa difusora na diferenciação, no processo de perda de carga e na deformação da camada de areia.

Para comparação entre os modelos de placa avaliados, utilizou-se análise de média (teste Tukey), ao nível de 1% de probabilidade, para avaliar a influência do fator qualitativo “placa difusora” na perda de carga do filtro para cada valor de taxa de filtração.

Adicionalmente, os dados de perda de carga em função da taxa de filtração foram ajustados ao modelo matemático exponencial (Equação 1) recomendado por PUIG-BARGUÉS et al.(2005) e MESQUITA et al. (2012 a), visando à análise desse processo para os modelos propostos de placa difusora. A análise de dados foi realizada em uma planilha eletrônica, gerando as tabelas de análise de variância e os coeficientes do modelo.

$$H_f = \beta_0 e^{\beta_1 \cdot T_f} \quad (1)$$

em que,

- H_f - perda de carga do filtro, kPa;
- β_0 - coeficiente de ajuste linear;
- β_1 - coeficiente de ajuste exponencial, e
- T_f - taxa de filtração, $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

As condições da superfície da camada de areia eram avaliadas utilizando imagem digital após a conclusão de cada ensaio experimental, para verificar a ocorrência de movimentação das partículas de areia e de possíveis padrões de transporte e acumulação dentro do filtro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, apresenta-se o resumo da análise de variância, ao nível de 1% de probabilidade, para o ajuste do modelo exponencial aos dados de perda de carga em função da taxa de filtração para as diferentes dimensões do modelo proposto de placa difusora e para o modelo original, enquanto, na Tabela 3, apresentam-se as equações ajustadas com os respectivos valores do coeficiente de determinação.

Semelhantes aos resultados obtidos por MESQUITA (2010), os ajustes dos dados ao modelo exponencial apresentaram-se significativos ao nível de 1% de probabilidade (Tabela 2), com valores dos coeficientes de determinação superiores a 91% (Tabela 3), sendo possível recomendá-los para a avaliação do comportamento hidráulico do processo de filtração para filtros de areia com diferentes configurações internas e nas condições de filtro vazio e com meio filtrante, no intervalo de taxa de filtração ensaiado.

TABELA 2. Análise de variância para a função exponencial ajustada na condição de filtro vazio e com meio filtrante. **Analysis of variance for the exponential function adjusted in the condition of empty filter and with the filter medium.**

Condição	Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio				
			D0	D1	D2	D3	D4
Filtro vazio	Regressão	1	3,22**	4,92**	4,24**	3,21**	4,92**
	Resíduo	10	0,0055	0,0227	0,03706	0,01433	0,04254
	Total	11	-	-	-	-	-
Filtro cheio	Regressão	1	2,35**	2,30**	2,08**	2,15**	2,52**
	Resíduo	10	0,00299	0,00961	0,01134	0,01318	0,00599
	Total	11	-	-	-	-	-

Obs.: ** - significativo a 1% de probabilidade; D0 - placa difusora original de fábrica; D1, D2, D3 e D4 - placa difusora proposta.

TABELA 3. Equação de perda carga - H_f (kPa) em função da taxa de filtração - T_f ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) para os modelos propostos de placa difusora e para o modelo original. **Head loss equation - H_f (kPa) as a function of filtration rate - T_f ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) for the proposed models of diffuser plate and the original model.**

Condição	Placa Difusora ¹	Equação	R ²
Filtro Vazio	D0	$H_f = 0,688 e^{0,0232 T_f}$	0,983
	D1	$H_f = 0,513 e^{0,0285 T_f}$	0,956
	D2	$H_f = 0,678 e^{0,0262 T_f}$	0,919
	D3	$H_f = 0,762 e^{0,0234 T_f}$	0,957
	D4	$H_f = 0,578 e^{0,0284 T_f}$	0,920
Filtro Cheio	D0	$H_f = 7,714 e^{0,0198 T_f}$	0,987
	D1	$H_f = 7,021 e^{0,0189 T_f}$	0,960
	D2	$H_f = 7,515 e^{0,0179 T_f}$	0,948
	D3	$H_f = 7,219 e^{0,0183 T_f}$	0,942
	D4	$H_f = 6,421 e^{0,0204 T_f}$	0,977

¹D0 - placa difusora original de fábrica; D1, D2, D3 e D4 - placa difusora proposta.

Na Figura 3, apresentam-se os comportamentos gráficos das equações ajustadas, mostrando a variação para as condições dos filtros ensaiados.

Na condição de filtro vazio (Figura 3a), é possível observar o aumento da diferença de perda de carga proporcionada pelos diferentes modelos de placa difusora com o aumento da taxa de filtração, ficando evidente que, na faixa de 80 a 100 $m^3 m^{-2} h^{-1}$, a placa difusora D4, com os maiores diâmetro e altura de borda, apresentou o maior valor de perda de carga para a maior taxa de filtração. Nessa condição de ensaio, verifica-se que o modelo original apresentou menores valores de perda de carga para as taxas de filtração utilizadas, sendo essa diferença mais evidente para as taxas de 80 a 100 $m^3 m^{-2} h^{-1}$. Na condição de ensaio do filtro com meio filtrante (Figura 3b), observou-se uma inversão do comportamento mostrado na condição de filtro vazio, em que a placa original (D0) apresentou os maiores valores de perda de carga para as taxas de filtração ensaiadas, e com as placas difusoras propostas apresentando uma variação de perda de carga idêntica.

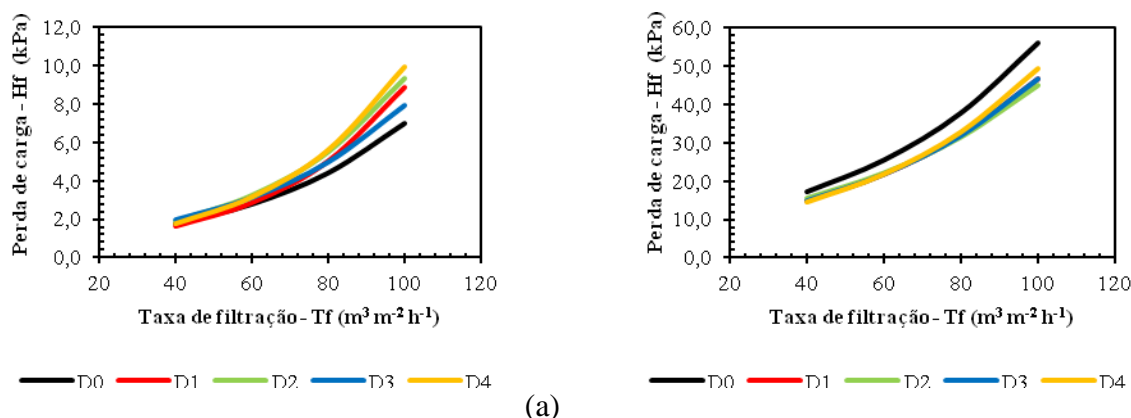


FIGURA 3. Perda de carga (kPa) em função da taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) para as diferentes placas difusoras na condição de filtro vazio (a), e com meio filtrante (b). Legenda: D0 - placa difusora original de fábrica; D1, D2, D3 e D4 – placa difusora proposta. **Head loss (kPa) depending on the filtration rate ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) for the different diffuser plates in the condition of empty filter (a) and with the filter medium (b). Legend: D0 - factory original diffusion plate; D1, D2, D3 and D4 - diffuser plate proposal.**

Com o intuito de comparar estatisticamente os valores de perda de carga proporcionados pelas diferentes placas difusoras (fonte de variação qualitativa), nas Tabelas 4 e 5, apresentam-se os resultados do teste Tukey, a 1% de probabilidade, para a condição de filtro vazio e com meio filtrante, respectivamente.

TABELA 4. Resultados do teste Tukey, ao nível de 1% de probabilidade, aplicado às médias de perda de carga (kPa) do filtro de areia vazio para as taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) ensaiadas¹. **Results of the Tukey test at 1% probability, applied to the average head loss (kPa) of the empty filter for the filtration rates ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) of the proposal plates¹.**

Placa Difusora ¹	Perda de Carga (kPa) - Filtro Vazio			
	Tf - 40 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$	Tf - 60 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$	Tf - 80 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$	Tf - 100 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$
D0	1,74 a	2,82 b	3,90 d	7,30 d
D1	1,60 a	3,40 a	6,79 b	8,53 c
D2	2,12 a	3,57 a	7,30 a	9,47 b
D3	2,02 a	3,56 a	6,18 c	7,73 d
D4	2,04 a	3,44 a	7,32 a	10,08 a

Obs.: Médias seguidas por letras diferentes na vertical diferem entre si, pelo teste de Tukey ($P < 0,01$). ¹D0 - placa difusora original de fábrica; D1, D2, D3 e D4 - placa difusora proposta.

TABELA 5. Resultados do teste Tukey, a 1% de probabilidade, aplicado às médias de perda de carga (kPa) do filtro de areia preenchido com meio filtrante para as taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) ensaiadas¹. **Results of the Tukey test at 1% probability, applied to the average head loss (kPa) of the sand filter filled with filter medium for the filtration rates ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) of the proposal plates¹.**

Placa Difusora ¹	Perda de Carga (kPa) - Filtro Cheio			
	Tf - 40 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$	Tf - 60 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$	Tf - 80 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$	Tf - 100 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$
D0	16,17 a	26,76 a	39,16 a	53,28 a
D1	14,55 a	25,76 a	37,15 a	47,70 b
D2	14,92 a	26,54 a	35,11 a	47,11 b
D3	14,28 a	26,57 a	35,44 a	45,86 b
D4	14,56 a	26,14 a	36,99 a	50,92 a

Obs.: Médias seguidas por letras diferentes na vertical diferem entre si, pelo teste de Tukey ($P < 0,01$). ¹D0 - placa difusora original de fábrica; D1, D2, D3 e D4 - placa difusora proposta.

Pela Tabela 4, pode-se observar que, para todos os valores de taxa de filtração na condição de filtro vazio, exceto para o valor de $40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, os modelos propostos de placa difusora apresentaram valores de perda de carga estatisticamente superiores ao modelo original, fato decorrente do acréscimo de resistência ao movimento da água promovido pela geometria proposta. Na condição de filtro vazio (Tabela 4), a diferença estatística entre os modelos de placas propostas aparecem apenas para as taxas de filtração de 80 e $100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Para o valor de $80 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, observou-se que as placas D2 ($d=11 \text{ cm}$ e $h=4,5 \text{ cm}$) e D4 ($d=14 \text{ cm}$ e $h=4,5 \text{ cm}$), com as maiores dimensões de bordas, apresentaram-se estatisticamente idênticas e com valores de perda de carga maiores que as demais placas. Analisando a taxa de filtração de $100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, observou-se que a placa D4 apresentou os maiores valores de perda de carga, confirmando o observado pela Figura 3a, seguida pelas placas D2, D1 e D3. De maneira geral, pode-se observar que a altura da borda do modelo proposto de placa difusora afetou diretamente no comportamento da perda de carga para as maiores taxas de filtração ensaiadas, em que a maior borda ($4,5 \text{ cm}$) atingiu os maiores valores.

Na condição de ensaio na presença de meio filtrante (Tabela 5), observou-se diferença estatística nos valores de perda de carga entre os modelos avaliados de placa difusora apenas para a taxa de filtração de $100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. A placa difusora D4 foi estatisticamente idêntica à D0, sendo estas maiores que as placas D3, D1 e D2, que também foram estatisticamente idênticas entre si. Este fato pode ser explicado com base na observação feita por MESQUITA (2010), que justificou, nas movimentações excessivas da superfície da camada de areia, o acréscimo de perda de carga no processo de filtração, no qual, para este caso, apesar de a nova placa difusora gerar maiores perdas isoladamente, gerou menores movimentações da camada de areia quando comparado à placa difusora original de fábrica, como ilustra a Figura 4.



FIGURA 4. Exemplo da condição final da superfície da camada da areia mostrando detalhes da movimentação para a placa difusora original (a), e para a placa difusora avaliada (b).
Example of the final condition of the sand layer surface showing details of movement for the original diffuser plate (a) and for the diffusion plate evaluated (b).

Apesar de o modelo proposto de placa difusora resultar em menor movimentação da camada de areia, a placa difusora com maior diâmetro e maior altura de borda (D4) causou a mesma magnitude de perda de carga do modelo original de fábrica (D0), para taxa de filtração de $100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Esse fato comprova a contribuição da geometria da placa D4 nos valores de perda de carga, em comparação ao benefício da menor movimentação da camada de areia em comparação à placa D0.

Pode-se observar pela Figura 4 a diferença na deformação da superfície da camada de areia gerada pelas placas difusoras, onde o modelo original causou visivelmente maior movimentação da areia. Como não foram realizadas quantificações das deformações da camada superficial da areia, não foi possível estimar a influência do diâmetro e da altura da borda da placa difusora proposta na deformação da camada de areia. De maneira geral, verificou-se que, para todos os ensaios realizados, existe a tendência de movimentação da areia da parede do filtro para o seu centro, onde

está localizada a placa difusora, comprovando sua influência na distribuição das linhas de fluxo no interior do equipamento.

BURT (1994) salienta que a deformação da camada de areia está diretamente relacionada ao projeto da placa difusora, com o que concorda MESQUITA (2010), que relatou que projetos inadequados causam distribuição desuniforme da água na superfície da camada de areia, criando zonas de turbulência próximas às paredes do filtro, causando deslocamento das partículas, formando caminhos preferenciais ao escoamento da água, que podem alterar tanto o comportamento hidráulico, como a eficiência de remoção do equipamento.

Pelas Tabelas 4 e 5, é também possível separar as contribuições da parte estrutural do filtro e da camada de areia na perda de carga total do equipamento. Dessa forma, observou-se que, na utilização do modelo original (D0), 11,23% referem-se à parte estrutural (placa difusora e crepinas) e 88,77% referem-se à camada de areia. Utilizando os modelos propostos de placa difusora, observou-se contribuição média de 16,10% pela estrutura do equipamento e 83,90% pelo meio filtrante. Em média, as contribuições relativas à perda de carga da camada de areia estão em concordância com os valores salientados por ARBAT et al. (2011) (84,6%); no entanto, a estimativa das contribuições da parte estrutural do filtro ficou acima do salientado pelo autor (11%), estando mais próximo apenas na utilização da placa difusora original de fábrica.

Teoricamente analisando, não se esperava diferenciação da contribuição da camada de areia na perda de carga total do equipamento, com a mudança da placa difusora. No entanto, observou-se interação entre o tipo de placa difusora com a deformação da camada de areia, fato que pode ter alterado o comportamento das linhas de fluxo dentro do filtro e, conseqüentemente, alterado a perda de carga do filtro (MESQUITA, 2010).

As taxas de filtração que determinaram diferenças significativas entre os valores de perda de carga (80 e $100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) estão inseridas nos intervalos salientados por MESQUITA (2010), por apresentarem relação exponencial com a perda de carga, explicando o aumento da diferença da perda de carga entre os modelos avaliados com o aumento da taxa de filtração.

Com relação aos resultados obtidos deste trabalho e baseando-se na faixa de utilização recomendada desses equipamentos (até $60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), é possível afirmar que, em termos energéticos, não houve diferença na utilização dos diferentes modelos de placa difusora com o modelo original; porém, devido à diferenciação gerada na deformação da camada de areia, as placas propostas, que causam menores deformações, deveriam ser utilizadas, com o intuito de evitar a construção de caminhos preferenciais ao deslocamento da água, prejudicando a eficiência de remoção do equipamento (MESQUITA, 2010).

CONCLUSÕES

A perda de carga gerada pelos modelos propostos de placa difusora não diferiu estatisticamente do modelo original na faixa recomendada de operação de filtros de areia (até $60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Mas, por outro lado, proporcionaram menores deformações da camada superficial da camada filtrante, o que contribui para a diminuição da formação de caminhos preferenciais da água na areia, podendo melhorar a eficiência de remoção do equipamento. A pesquisa demonstrou a existência de interação entre o modelo de placa difusora utilizada em filtros de areia e o revolvimento da superfície da camada de areia.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão da bolsa ao primeiro autor, e à FAPESP, pelo financiamento do projeto de pesquisa, que possibilitaram melhores condições para a realização deste trabalho. À empresa Hidro Solo Indústria e Comércio, pela doação do filtro de areia, e à empresa Teotokus, pela doação da areia utilizada nos ensaios.

REFERÊNCIAS

- ARBAT, G.; PUJOL, T.; PUIG-BARGUÉS, M.; DURAN-ROS, M.; BARRAGÁN, J.; MONTORO, L.; CARTAGENA, F.R. Using computational fluid dynamics to predict head losses in the auxiliary elements of microirrigation sand filter. *Transactions of the ASABE*, St. Joseph, v.54, n.4, p.1.367-1.376, 2011.
- ASABE. AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. *Media filters for irrigation - Testing and performance reporting*, St. Joseph, 1994 (ASAE S539).
- BURT, C.M. Media tanks for filtration - Part I: tank sizing and media selection. *Irrigation Journal*, Urbana, p.15-17, 1994.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v.15, p.1.529-1.534, 2007.
- DURAN-ROS, M.; PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F.R. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.96, p.67-79, 2009.
- LEMOES FILHO, M.A.F.; ZANINI, J.R.; SILVA, E.R.S.; CAZETTA, J.O.; FERRAUDO, A.S. Sistema com aeração, decantação e filtração para a melhoria da qualidade de água em irrigação localizada. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.31, n.3, p.506-519, maio/jun. 2011.
- MESQUITA, M. *Efeito dos componentes hidráulicos e da granulometria e altura da camada filtrante na perda de carga em filtros de areia utilizados na irrigação localizada*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; RAMIREZ, J.C.S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. *Agricultural Water Management*, v.115, p.178-185, 2012b.
- MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; SALCEDO, J.C.; BIZARI, D.R. Contribuição da estrutura interna na perda de carga de filtros de areia utilizados na irrigação. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.32, n.1, p.121-130, jan./fev. 2012a.
- PUIG-BARGUÉS, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F.; BARRAGÁN, J. Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration in microirrigation systems using dimensional analysis. *Biosystems Engineering*, London, v.92, n.3, p.383-390, 2005.
- SALCEDO, J.C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Processo de retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.31, n.6, p.1.226-1.237, nov./dez., 2011.
- TESTEZLAF, R. Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.28, n.3, p.604-613, 2008.
- YURDEM, H.; DEMIR, V.; DEGIRMENCIOGLU, A. Development of a mathematical model to predict head losses from disc filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. *Biosystems Engineering*, London, v.100, n.1, p.14-23, 2008.