



GABRIEL DLOUHY ALCON

**INFLUÊNCIA DA PLACA DIFUSORA NA REMOÇÃO DE
SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS EM FILTRO DE AREIA
PRESSURIZADO**

LAVRAS – MG

2022

GABRIEL DLOUHY ALCON

**INFLUÊNCIA DA PLACA DIFUSORA NA REMOÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS
TOTAIS EM FILTRO DE AREIA PRESSURIZADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de mestre

Prof. Dr. Fábio Ponciano de Deus

Orientador

LAVRAS – MG

2022

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Alcon, Gabriel Dlouhy.

Influência da placa difusora na remoção de sólidos suspensos
totais em filtro de areia pressurizado / Gabriel Dlouhy Alcon. -
2022.

78 p.

Orientador(a): Fábio Ponciano de Deus.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Irrigação Localizada. 2. Tratamento Físico da água. 3.
Eficiência de remoção. I. de Deus, Fábio Ponciano. II. Título.

GABRIEL DLOUHY ALCON

**INFLUÊNCIA DA PLACA DIFUSORA NA REMOÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS
TOTAIS EM FILTRO DE AREIA PRESSURIZADO**

**INFLUENCE OF THE DIFFUSER PLATE ON THE REMOVAL OF TOTAL
SUSPENDED SOLIDS IN PRESSURIZED SAND FILTER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 21 de outubro de 2022.

Dr. Adriano Valentim Diotto UFLA

Dr. Antônio Pires de Camargo UNICAMP

Dr. Victor Buono da Silva Baptista UFLA

Prof. Dr. Fábio Ponciano de Deus

Orientador

LAVRAS – MG

2022

AGRADECIMENTOS

A Deus por me colocar a frente das melhores oportunidades e de me guiar em minhas escolhas.

Aos meus pais, Ângela e Oscar Francisco, por proporcionarem condições de eu chegar onde estou hoje e por acreditarem nas minhas escolhas.

A minha namorada Letícia por estar ao meu lado nessa jornada, pelo companheirismo e pelo incentivo para seguir em frente

A toda minha família, em especial meus irmãos que sempre me incentivaram.

Ao meu orientador Prof. Fábio Ponciano de Deus pelos valiosos ensinamentos e paciência.

A todo corpo docente do departamento, em especial os professores Adriano Adriano Valentim Diotto e Victor Buono da Silva Baptista por me aconselharem na pesquisa.

Aos alunos Yimga Nana e Nicolas Antônio Baptistella Zueleta pelo apoio na pesquisa.

A todo corpo técnico DRH, em especial Elvis e Renato por sempre estarem dispostos a me ajudar.

À República Lobo Mau que contribuiu no meu desenvolvimento profissional e apoio nesta jornada.

À empresa Moinhos Gerais (Ribeirão Vermelho/MG) pela doação da areia utilizada na pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras e ao departamento de Recursos Hídricos e Saneamento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). (Demanda Universal/Processo APQ-01580-21).

Muito obrigado!

RESUMO

A eficiência de remoção dos filtros de areia, utilizados na irrigação localizada, varia de acordo com as condições de operação e as características do meio filtrante, com diferenças de retenção de sólidos entre as camadas superficial e profundas. Estudos mostraram que diferentes modelos de placa difusora causam alteração no comportamento das linhas de fluxo da água no processo de filtração, alterando o comportamento hidráulico e o revolvimento da camada superficial do leito filtrante, relacionando-se com o desenvolvimento de caminhos preferenciais para passagem da água e de sólidos, o que pode influenciar na capacidade dos filtros de remover sólidos suspensos. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes modelos de placa difusora combinadas às diferentes taxas de filtração e alturas de camada filtrante, na eficiência de remoção de sólidos suspensos totais utilizando um filtro de areia comercial. O trabalho foi dividido em duas partes. A primeira visou avaliar o comportamento hidráulico do processo de filtração do equipamento e o revolvimento da camada superficial do leito filtrante, combinando duas alturas de leito filtrante e sete taxas de filtração, utilizando água sem sólidos em suspensão. Já a segunda parte visou avaliar a eficiência de remoção do processo de filtração do filtro utilizando duas alturas de camada filtrante e duas taxas de filtração. Nas duas partes utilizou-se areia sílica como meio filtrante. O processo de filtração do filtro de areia utilizando a placa difusora proposta apresentou as menores perdas de pressão no uso do filtro vazio quando comparado à placa difusora original, entretanto ao utilizar leito filtrante observou-se redução na diferenciação da perda de pressão entre as placas avaliadas, onde a placa proposta causou maiores perdas relativas à camada filtrante. Adicionalmente não houve observou-se diferenciação no revolvimento da camada superficial para os tratamentos avaliados. Com relação à eficiência de remoção os métodos de avaliação apresentaram resultados semelhantes, mostrando que uma maior amostragem da água leva a resultados mais confiáveis. A placa difusora proposta teve maior eficiência de remoção no uso da menor altura da camada filtrante e menor taxa de filtração, já para placa original foi na maior altura da camada e maior taxa de filtração. De modo geral, o modelo construtivo da placa difusora influencia tanto o comportamento hidráulico quanto a eficiência de remoção de sólidos suspensos contidos na água no processo de filtração, onde o seu dimensionamento deve levar em consideração as características físicas da camada filtrante e as condições de operação a fim de se alcançar resultados satisfatórios.

Palavras chave: Irrigação localizada; entupimento de emissores; tratamento físico da água; eficiência de remoção.

ABSTRACT

The removal efficiency of sand filters, used in localized irrigation, varies according to the operating conditions and the characteristics of the filter medium, with differences in solid retention between the superficial and deep layers. Studies have shown that different diffuser plate models cause changes in the behavior of the water flow lines in the filtration process, altering the hydraulic behavior and the turning of the surface layer of the filtering bed, relating to the development of preferential paths for the passage of water, which can influence the ability of filters to remove suspended solids. In this context, the present work aimed to evaluate the influence of different diffuser plate models combined with different filtration rates and filtering layer heights, on the efficiency of removal of total suspended solids using a commercial sand filter. The work was divided into two parts. The first aimed to evaluate the hydraulic behavior of the equipment's filtration process and the turning of the surface layer of the filtering bed, combining two filtering bed heights and seven filtration rates, using water without suspended solids. The second part aimed to evaluate the removal efficiency of the filter filtration process using two filter layer heights and two filtration rates. In both parts, silica sand was used as a filter medium. The sand filter filtration process using the proposed diffuser plate showed the lowest pressure losses when using the empty filter when compared to the original diffuser plate, however, when using a filter bed, a reduction in the difference in pressure loss between the evaluated plates was observed, where the proposed plate caused greater losses relative to the filtering layer. Additionally, there was no difference in the turning of the surface layer for the evaluated treatments. Regarding the removal efficiency, the evaluation methods presented similar results, showing that a larger sampling of the water leads to more reliable results. The proposed diffuser plate had greater removal efficiency when using the lowest filtering layer height and lowest filtration rate, whereas for the original plate it was at the highest layer height and highest filtration rate. In general, the constructive model of the diffuser plate influences both the hydraulic behavior and the efficiency of removal of suspended solids contained in the water in the filtration process, where its dimensioning must take into account the physical characteristics of the filtering layer and the operating conditions in order to achieve satisfactory results.

Keywords: Localized irrigation; clogging of emitters; physical water treatment; removal efficiency.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| PRIMEIRA PARTE | 9 |
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 2.1 Filtros de areia utilizados na irrigação | 13 |
| 2.2 Influência da placa difusora no processo de filtração em filtros de areia | 14 |
| 2.3 Processo de filtração em filtros de areia | 16 |
| 2.4 Material filtrante utilizado em filtros de areia | 18 |
| 2.5 Avaliação do processo de filtração em filtros de areia | 19 |
| 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 21 |
| SEGUNDA PARTE | 24 |
| ARTIGOS | 24 |
| INFLUÊNCIA DO MODELO CONSTRUTIVO DE PLACA DIFUSORA NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DA FILTRAÇÃO EM FILTRO DE AREIA PRESSURIZADO | 26 |
| 1 Introdução | 27 |
| 2 Material e métodos | 28 |
| 3 Resultados e discussão | 33 |
| 3.5 Conclusões | 42 |
| 3.6 Referências bibliográficas | 42 |
| EFEITO DO MODELO CONSTRUTIVO DA PLACA DIFUSORA NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS NO PROCESSO DE FILTRAÇÃO EM FILTRO DE AREIA PRESSURIZADO | 46 |
| 1 Introdução | 47 |
| 2 Material e métodos | 49 |
| 3 Resultados e discussão | 58 |
| 4 Conclusões | 74 |
| 5 Referências Bibliografia | 75 |

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Diante da crise hídrica que atinge todo mundo, alternativas viáveis para a manutenção dos setores econômicos são imprescindíveis. Na agricultura irrigada, a principal alternativa é o uso de sistemas de irrigação localizada, que estão entre os sistemas mais eficientes no uso água e energia (ANA, 2021). Apesar dos evidentes benefícios ambientais e econômicos do método, o entupimento dos seus emissores é a sua principal limitação, resultando em aumento dos custos com manutenção, operação e substituição de equipamentos (TESTEZLAF, 2008).

No Brasil, a água utilizada na irrigação, em sua maior parte, é de origem superficial, os quais possuem elevada quantidade de sólidos em suspensão e dissolvidos (TESTEZLAF, 2008). Desta forma, para que haja qualidade de água satisfatória para o uso em sistemas de irrigação localizada, torna-se fundamental o tratamento físico e/ou químico da água (TESTEZLAF et al., 2014). O tratamento físico é recomendado quando os emissores apresentam entupimentos ocasionados por matérias inorgânicas (areia, silte e argila) e orgânicas (formigas, lesmas, larvas, ovos de insetos, algas) em suspensão na água de irrigação (TEZTESLAF, 2008).

Na irrigação, os equipamentos utilizados no tratamento físico da água são: hidrociclone, filtro de tela, filtro de disco, e o filtro de areia (FRIZZONE et al., 2012). Dentre os equipamentos utilizados na irrigação, o filtro de areia destaca-se na remoção de sólidos de origem orgânica (TESTELAF, 2008). Adicionalmente Puig-Bargués et al. (2005) afirmam que filtros de areia proporcionam maiores remoções de partículas e sólidos suspensos totais quando comparado aos filtros de tela e disco. Testezlaf (2008) afirma que os filtros de areia apresentam maior faixa de remoção de partículas, onde os filtros de areia removem partículas maiores que 12,5 μm , enquanto que os filtros de tela e de disco removem partículas maiores que 75 μm .

O uso dos filtros de areia baseia-se em duas operações, que são distintas, porém complementares. Inicialmente realiza-se a filtração, processo de remoção dos sólidos em suspensão pela passagem forçada da água pela camada filtrante. Neste processo, a água normalmente escoar pelo filtro no sentido descendente (MESQUITA et al., 2019). Posteriormente realiza-se a retrolavagem, que é o processo de limpeza do equipamento, no qual o fluxo da água é invertido (normalmente ascendente), proporcionando expansão da camada filtrante e posteriormente remoção dos sólidos aderidos ao leito filtrante (de DEUS et al., 2016).

Apesar do filtro de areia ser um equipamento utilizado há muito tempo na agricultura irrigada, têm-se ainda muitas dúvidas e dificuldades na sua correta operação, havendo questionamentos sobre as condições operacionais que determinam a maior eficiência de remoção tanto no processo de filtração quanto na retrolavagem. De acordo com Testezlaf et al.

(2014), a eficiência de remoção de filtros de areia é influenciada pelo modelo de estrutura interna do equipamento, pelas características físicas do leito filtrante, pela altura da camada filtrante, pela taxa de filtração, e pela velocidade superficial utilizada na retrolavagem.

Os filtros de areia são constituídos basicamente por duas estruturas internas: placa difusora e sistema de drenagem. A placa difusora é a estrutura responsável por evitar a colisão da água diretamente na superfície da camada filtrante no processo de filtração, a fim de reduzir a velocidade e promover uma distribuição mais uniforme da água na superfície da camada filtrante. O sistema de drenagem é responsável por direcionar a água filtrada para o sistema de irrigação no processo de filtração, e pela distribuição da água para a expansão da camada filtrante no processo de retrolavagem (TESTEZLAF et al., 2014).

Alguns trabalhos demonstraram a influência do projeto dessas estruturas na eficiência energética dos filtros de areia (MESQUITA et al., 2012; de DEUS et al., 2013; MESQUITA et al., 2017; MESQUITA et al., 2019, PUJOL et al., 2022). Especificamente com relação à placa difusora, de DEUS et al. (2013) demonstraram que o modelo construtivo de placa influencia na deformação da superfície da camada filtrante, tendo como consequência a alteração da perda de carga do processo de filtração. Em trabalho de Mesquita et al. (2019) isso foi constatado, de forma a evidenciar que o correto dimensionamento da placa difusora diminui significativamente a deformação da superfície da camada filtrante.

A influência da granulometria da areia que compõe o material filtrante, associado a diversos fatores intervenientes nos processos de filtração são demonstrados em diversos trabalhos (MESQUITA et al., 2012; MESQUITA et al., 2019; de DEUS et al., 2016; de DEUS et al., 2020). De maneira geral, na filtração as menores granulometrias determinam maior eficiência de remoção e maior incremento da perda de carga no tempo (MESQUITA et al., 2019).

Outro fator referente à composição da camada filtrante refere-se à sua altura. Em tese, quanto maior a altura da camada filtrante, maior a capacidade do filtro em armazenar contaminantes (TESTEZLAF, 2008). Entretanto, em trabalho desenvolvido por Mesquita et al. (2019) concluiu-se que quanto maior a altura da camada filtrante (superfície da camada mais próxima da placa difusora), maior a deformação da superfície, podendo afetar o comportamento hidráulico e a eficiência de remoção, em filtros de mesmo tamanho. Neste sentido, os autores salientaram que a definição da altura do leito filtrante deve estar associada à avaliação da influência na deformação da superfície da camada filtrante e das respostas hidráulicas e de remoção de contaminantes.

Com base nas informações apresentadas, a hipótese desse projeto é de que a remoção de sólidos suspensos totais da água no processo de filtração em filtro de areia comercial utilizado na irrigação localizada é influenciada pelo modelo de placa difusora, taxa de filtração e altura da camada filtrante. Buscando contribuir com informações técnico-científicas para a compreensão da influência das variáveis diretamente relacionadas ao processo de filtração em filtros de areia utilizados na irrigação, o objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a variação da eficiência de remoção de um modelo comercial de filtro de areia utilizado na irrigação operando a filtração no uso de diferentes alturas de leito filtrante, taxas de filtração e modelos de placa difusora, para um determinado nível de contaminação da água. Para isso o projeto se fundamentou nos seguintes objetivos específicos: a) caracterização física do meio filtrante; b) caracterização física e química da água a ser utilizada no experimento; c) ensaios de filtração com água limpa para a caracterização hidráulica do filtro de areia e da deformação da superfície da camada filtrante; d) ensaios de filtração com água contaminada para a determinação da eficiência de remoção e da perda de pressão do equipamento no tempo, bem como a deformação da superfície da camada filtrante.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Filtros de areia utilizados na irrigação

Em decorrência da elevada concentração de materiais orgânicos e inorgânicos em suspensão nas águas superficiais, o tratamento físico da água é fundamental para o uso em sistemas de irrigação localizada (TESTEZLAF et al., 2014). O entupimento dos emissores é a principal limitação desses sistemas, podendo afetar a uniformidade de aplicação dos sistemas, bem como os custos de manutenção e substituição dos equipamentos (TESTEZLAF, 2008).

Dentre os equipamentos que realizam o tratamento físico da água na irrigação localizada, têm-se o filtro de tela, o filtro de discos, o hidrociclone, e o filtro de areia (PITTS, 1990). Segundo Testezlaf (2006), os filtros de tela e de discos apresentam capacidade de remover partículas acima de 75 μm , enquanto os filtros de areia apresentam capacidade de remover partículas acima de 12,5 μm . Em trabalho desenvolvido por Deus et al. (2015) verificou-se que os filtros de areia apresentam efetividade na remoção de partículas maiores que 60 μm . Em estudo realizado por Puig-Bagués et al., (2005) comparando três tipos de filtros (tela, disco e areia), foi constatado superioridade de remoção de sólidos em filtros de areia para concentrações elevadas de sólidos suspensos totais (acima de 176 mg L^{-1}).

Os filtros de areia pressurizados utilizados na irrigação são basicamente tanques ou reservatórios cilíndricos metálicos (Figura 1), produzidos a partir de placas de aço carbono, e em alguns casos de aço inoxidável (TESTEZLAF et al., 2014). Seu interior é preenchido com um ou mais tipos de material filtrante (cascalhos, areia ou algum outro material granular), onde através da passagem forçada do fluido as impurezas são removidas (DI BERNARDO, 2003). Recebem a denominação de pressurizados por operarem, geralmente, com pressões superiores a 300 kPa, e são considerados filtros rápidos devido às elevadas vazões dos projetos de irrigação (TESTEZLAF et al., 2014). São revestidos internamente com proteção em tinta epóxi, com o intuito de prevenir a corrosão e reduzir os desgastes, principalmente rupturas nas soldas. Externamente são revestidos em poliéster para proteção contra raios ultravioletas.

Figura 1 - Filtro de areia utilizado em irrigação localizada.



Fonte: Testezlaf et al., 2014.

Na Figura 1 estão ilustrados os componentes de um filtro de areia, sendo: abertura para tubulação de entrada (1), placa difusora (2), leito ou camada filtrante (3), abertura para tubulação de saída de água (4), sistema de drenagem (5), abertura para remoção do leito filtrante e limpeza do tanque (6), e abertura para verificação e enchimento do filtro de areia (7).

Nos filtros de areia são realizadas basicamente duas operações. A primeira é denominada por filtração ou filtração, onde a água que entra normalmente pela parte superior do filtro (fluxo descendente) tem sua passagem forçada por um meio filtrante, ocorrendo a remoção de sólidos suspensos contidos na água (MESQUITA, 2014). A segunda operação realizada é denominada por retrolavagem, que é o processo de limpeza do equipamento (TESTEZLAF et al. 2014), onde o fluxo da água é normalmente invertido (ascendente), podendo ser operado de forma automática ou manual, determinando a expansão do leito filtrante (fluidização do leito filtrante), e removendo as partículas retidas na camada filtrante durante o processo de filtração.

2.2 Influência da placa difusora no processo de filtração em filtros de areia

A placa difusora trata-se de estrutura alocada na parte superior do filtro de areia, abaixo da entrada de água, destinada a reduzir a energia cinética do escoamento e proporcionar a distribuição do afluente de forma mais uniforme possível sobre a superfície do leito filtrante (MESQUITA et al., 2019).

Os modelos de filtro de areia desenvolvidos no Brasil foram construídos de forma adaptada, copiando-se modelos de outros países, onde a elaboração de seus elementos internos (placa difusora e sistema de drenagem) foram realizadas sem critério de projeto (MESQUITA

2014). Isto leva a alterações do comportamento hidráulico e distribuições pouco uniformes, podendo inferir na redução da eficiência dos filtros dificultando sua correta operação (MESQUITA et al., 2012). Em trabalho desenvolvido por de Deus et al. (2013) constatou-se que a forma geométrica da placa difusora afeta a perda de carga do equipamento. Os autores constaram que as placas difusoras que determinaram maior revolvimento da superfície da camada filtrante causaram perda de carga superior do leito filtrante (perda de carga filtro cheio subtraído da perda de carga do filtro vazio), onde supõe-se que a causa está na produção de linhas de fluxo irregulares e na sua interação com a superfície da camada de areia. O revolvimento da areia da superfície da camada filtrante é ilustrado na Figura 2.

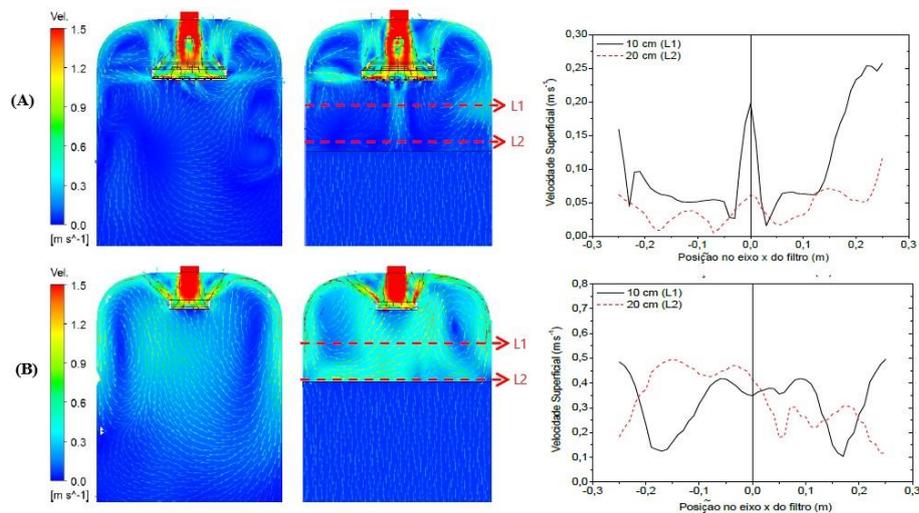
Figura 2 - Revolvimento da camada superficial da areia para as placas difusoras plana (a) e plana com bordas (b).



Fonte: de Deus et al. (2013).

de Deus et al. (2013) lançaram a hipótese de influência do modelo de placa difusora na eficiência de remoção do equipamento, em decorrência da alteração que a placa proporciona às linhas de fluxo que pode influir na distribuição dos sólidos contidos na água. Em trabalho desenvolvido por Mesquita et al. (2019) utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD), foi observado que o modelo de placa difusora altera o comportamento das linhas de fluxo no interior dos filtros, onde para um modelo adequadamente projetado houve redução do revolvimento da superfície da camada filtrante. A Figura 3 apresenta o resultado das linhas de fluxo comparando o modelo adequadamente projetado com um modelo comercial de placa difusora.

Figura 3 - Linhas de fluxo geradas por duas placas difusoras diferentes (A – placa difusora adequadamente projetada / B – placa difusora comercial).



Fonte: Adaptado de Mesquita (2014).

Em comparação à placa comercial, o modelo de placa adequadamente projetado promoveu vórtices com intensidade reduzida, além de velocidades médias menores sobre superfície da camada filtrante, em todas as posições no eixo x do filtro (Figura 3). Este comportamento foi reforçado por Pujol et al. (2022), onde utilizando CFD, o modelo de placa difusora avaliado modificou a localização de ocorrência dos vórtices e a velocidade tangencial sobre a superfície da areia, sem alterações na perda de pressão do filtro.

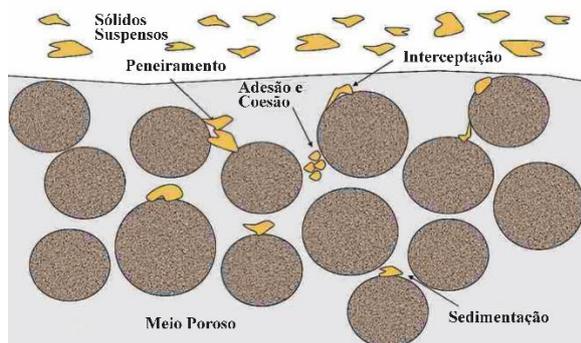
Desta forma fica evidente a influência do modelo da placa difusora nos filtros de areia, onde através do correto dimensionamento pode-se atingir menores gastos energéticos com processos de filtrações mais eficientes.

2.3 Processo de filtração em filtros de areia

De acordo com Pizarro Cabello (1996), a filtração da água por meios porosos é uma ocorrência resultante de três processos (Figura 4). O primeiro é denominado como "peneiramento ou coamento", caracterizado pela ação superficial do leito filtrante onde as partículas maiores que os poros ficam retidas. O segundo processo é denominado "sedimentação e decantação", onde as partículas que passaram a superfície da camada filtrante, em decorrência da redução da velocidade, ficaram depositadas entre os poros ou na face dos grãos de areia. O último processo é denominado por "adesão e coesão", onde as partículas em suspensão na água podem ficar retidas nos grãos de areia ou em aglomerados de sujeira devido

à atração eletrostática. Este último processo explica o motivo do filtro de areia ter a capacidade de reter partículas menores que o tamanho dos poros existentes na camada filtrante.

Figura 4 - Ações presentes na retenção de partículas no processo de filtragem.



Fonte: Testezlaf et al. (2014).

Di Bernardo (2005) explica o mecanismo de remoção de sólidos em meios filtrantes dividindo o processo em três etapas: transporte; aderência; e desprendimento. No transporte as partículas contidas na água são transportadas até a superfície da camada filtrante. Na aderência as partículas são retidas no meio poroso por adesão, coesão e sedimentação, causando o preenchimento dos poros e o aumento da velocidade intersticial. A terceira etapa refere-se ao desprendimento das partículas do leito filtrante, sendo direcionados ao sistema de irrigação (DI BERNARDO, 2005). Nos resultados de Mesquita et al. (2019) foi possível identificar a ocorrência do processo de desprendimento de partículas quando se observou valores negativos de eficiência de remoção.

A contaminação da camada de areia pelos sólidos contidos na água ocorre de forma gradual, iniciando com a contaminação da parte superficial do leito filtrante, onde após sua saturação, os sólidos retidos se deslocam para as camadas seguintes, contaminando toda a camada de areia (Di BERARDO, 2003). À medida que os sólidos ficam aderidos ao meio filtrante, os poros reduzem de dimensão, aumentando a velocidade intersticial da água, e consequentemente podendo as tensões cisalhantes do fluido vencer a forças de coesão das partículas retidas, resultando no arraste de sólidos para as camadas seguintes (Di BERARDO, 2003).

O acúmulo de partículas nos poros da camada filtrante resulta no aumento da velocidade do fluido, resultando em aumento da perda de carga do processo (DI BERNARDO, 2005; MESQUITA et al., 2019). De acordo com os autores, esse incremento é intensificado com a diminuição da granulometria da areia e com o aumento da taxa de filtração. De acordo com

MESQUITA et al. (2019) a diminuição da granulometria da areia associado ao aumento da taxa de filtração determinou a maior capacidade de remoção de sólidos, resultando em maior incremento da perda de carga no tempo.

Existem variadas recomendações na literatura a respeito da taxa de filtração a ser utilizada em filtros de areia. Lawrence (2008) recomenda a faixa de 35 a 60 $\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-2}$, sendo a menor taxa para o máximo de 100 ppm de sólidos suspensos na água, e a maior taxa para o máximo de 10 ppm de sólidos. Para Philips (1995) as taxas de filtração devem estar compreendidas entre 36 e 61,2 $\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-2}$. Para Mesquita (2010) a melhor faixa está entre 20 e 60 $\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-2}$, faixa com incremento linear da perda de carga em função da taxa de filtração. Em trabalho desenvolvido por Mesquita et al. (2019), observou-se que o melhor resultado em termos de remoção de sólidos em suspensão na água no processo de filtração ocorreu no uso da máxima taxa de filtração avaliada (75 $\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-2}$).

2.4 Material filtrante utilizado em filtros de areia

A areia é o principal elemento filtrante utilizado em filtros de areia, podendo haver a combinação com outros materiais, tais como pedregulho e antracito (Di BERARDO, 2003). Contudo, não há nenhuma norma para a utilização de areias em filtros pressurizados utilizados na irrigação (TESTEZLAF et al., 2014). No Brasil há apenas uma norma que determina as condições de recebimento e uso dos materiais filtrantes no tratamento de água para abastecimento humano (NBR 11799:1990).

Em termos de caracterização do material filtrante, tem-se realizado a determinação do diâmetro efetivo bem como do coeficiente de uniformidade. De acordo com Haman et al. (1994), o “diâmetro efetivo (D_{10})” refere-se à abertura da peneira granulométrica que permite a passagem de 10% da massa total do material filtrante avaliado. Para Testezlaf et al. (2014) refere-se ao diâmetro da areia de referência para indicar o menor tamanho de partícula a ser removida (1/12 a 1/10 do diâmetro efetivo). Já o coeficiente de uniformidade refere-se à relação entre a abertura da peneira granulométrica que permite a passagem de 60% do material (D_{60}), e o diâmetro efetivo (D_{10}). Pizarro Cabello (1996) recomenda o uso de materiais filtrantes em filtros de areia com coeficiente de uniformidade entre 1.4 e 1.6, e Haman et al. (1994) considera 1.5 adequado para fins de irrigação.

Outra definição importante no uso de filtros de areia refere-se à altura da camada filtrante. De acordo com Pizarro Cabelo (1996), a remoção de partículas na água aumentará até uma certa altura, onde o incremento desta não resultará em incremento de remoção. Nesse sentido os autores recomendam, independente das dimensões do equipamento, o uso de 0.4 a

0.6 m de altura de leito filtrante. Esta observação também foi realizada no trabalho de Mesquita et al. (2019a). De maneira geral encontra-se na literatura diversas recomendações. Vermerein e Jobling (1984) recomendam o uso de camadas de 0,5 a 1 m, salientando que a altura do leito filtrante influencia diretamente na eficiência de remoção do equipamento. de Deus et al. (2016) recomenda o uso de leito filtrante com altura limite que respeite espaço equivalente a 25% para expandir a camada filtrante no processo de retrolavagem do equipamento. Em trabalho desenvolvido por Mesquita et al. (2019) ficou evidente que a definição da altura da camada filtrante deve estar em consonância com o projeto da placa difusora, a fim de se evitar a influência no revolvimento da superfície da camada filtrante, e otimizar a remoção de contaminantes pela camada.

2.5 Avaliação do processo de filtração em filtros de areia

O principal parâmetro utilizado na avaliação de filtros de areia é a eficiência de remoção, definido por Haman et al. (1994) como a habilidade do equipamento em remover partículas de um certo tamanho. A norma ASAE (1994) define matematicamente a eficiência de remoção do processo de filtração em filtros de areia de acordo com a equação 1:

$$ER_{SST} = \left(1 - \frac{SST_2}{SST_1}\right) \times 100 \quad (1)$$

Onde: ER_{SST} - eficiência de remoção do processo de filtração em filtros de areia (%); SST_2 - sólidos suspensos totais na saída do filtro (mg L^{-1}); SST_1 - sólidos suspensos totais na entrada do filtro (mg L^{-1}).

Em estudo desenvolvido por de Deus (2014), observou-se influência tanto da granulometria da areia quanto da taxa de filtração na eficiência de remoção no processo de filtração em filtro de areia comercial. O autor observou que o aumento da taxa de filtração associado à diminuição da granulometria de areia determinou incremento na eficiência de remoção, contudo a capacidade de remoção diminuiu para ciclos de filtração posteriores. Haman et al. (1994) também salientam que a diminuição da granulometria da areia determina incremento da remoção de partículas no processo de filtração em filtros de areia. de Deus et al. (2015) observaram o mesmo comportamento na avaliação do tamanho de partículas removidas, evidenciado que o filtro de areia foi efetivo na remoção de partículas acima do tamanho correspondente à areia fina.

Adicionalmente de Deus (2014) observou que a metodologia proposta pela norma ASAE (1994), que consiste na coleta de amostra de água antes e após o filtro de areia, possui limitação de representatividade em decorrência da dinâmica do processo de filtração. Observou-se intensa variabilidade temporal dos sólidos suspensos na saída do filtro, resultado da ocorrência do desprendimento de partículas como salientado por Di Bernardo (2003), determinando comportamento imprevisível da eficiência de remoção pela metodologia de coleta de água. Nesse sentido, foi proposto metodologia de avaliação de remoção pela análise da sujidade da areia, publicada por Mesquita et al. (2019), onde foi comprovado a influência positiva da diminuição da granulometria da areia e do aumento da taxa de filtração. Adicionalmente observou-se significativa influência da superfície do leito filtrante na remoção dos sólidos, evidenciando o processo do peneiramento como salientado por Pizarro Cabelo (1996).

Outra forma de avaliar indiretamente a remoção de sólidos em filtros de areia é pela avaliação da perda de carga do equipamento no tempo. Em trabalho desenvolvido por Mesquita et al. (2019b) foi apresentado a perda de carga no processo de filtração ponderada pela massa de sólidos retida na camada de areia, onde os maiores valores ocorreram nos tratamentos que proporcionaram maior remoção de sólidos (menor granulometria de areia e maior taxa de filtração).

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19. ed., Washington D.C.: APHA/AWWA/WPCF. 1995. 798p.

AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. EP405.1: **Design and installation of microirrigation systems**. St. Joseph, MI, Dec. 1993.

AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. S539: **Media filters for irrigation —Testing and performance reporting**, march 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 2097: **Material filtrante: Areia, antracito e pedregulho – Especificação**. Rio de Janeiro, 1990.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada /Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021.

BENHAM, B.; ROSS, B. **Filtration, Treatment and Maintenance**: Considerations for Micro-Irrigation Systems. Virginia: Cooperative Extension, 2002.

BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BROUCKAERT, M. B. **Hydrodynamic detachment of deposited particles in fluidized bed filter backwashing**. Dissertation Degree. Georgia Institute of Technology, Georgia. 2004. 383p.

BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R. G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural and Water Management**, v. 2, n. 2. p. 149-162, 1979.

BURT, C. M. **Hydraulics of commercial sand media filter tanks used for agricultural drip irrigation: criteria for energy efficiency**. Irrigation Training and Research Center, 2010, 35p. Disponível em: www.itrc.org/reports/mediafilters.htm. Acesso em: setembro de 2020.

CABELLO, F. P. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación**. 3.ed. Madrid: Mundi Prensa, 1996. 513p.

de DEUS, F. P.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Efeito das dimensões da placa difusora no comportamento hidráulico de um modelo comercial de filtro de areia. **Engenharia Agrícola**, v.33, p.560-568, 2013.

de DEUS, Fábio Ponciano de. **Eficiência de remoção nos processos de filtração e retrolavagem em filtros de areia pressurizados**. 2014. 150 p. Tese (doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

de DEUS, Fábio Ponciano de; TESTEZLAF, Roberto; MESQUITA, Marcio. Eficiência de filtros de areia pressurizados na remoção de diferentes tamanhos de partículas da água de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 939-948, 2015.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. Ed. Rima Editora, 2005. 1565 p.

DI BERNARDO, L. **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. Rio de Janeiro: Rima Editora, 2003. 498 p.

GUPTA, C. K.; SATHIYAMOORTHY, D. **Fluid bed technology in materials processing**. New York. 1999. p. 1-125.

HAMAN, D. Z.; SMAJSTRLA, A. G.; ZAZUETA, F. S. **Media filters for trickle irrigation in Florida**. University of Florida. 1994. 5 p.

LAWRENCE, J. S. **Filtration and particulate removal**. **Encyclopedia of Water Science**. 2.ed. University of California, California, 2003. p.289-293.

MESQUITA, M. **Desenvolvimento tecnológico de um filtro de areia para irrigação localizada**. 2014. 169 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

MESQUITA, M. **Avaliação dos componentes hidráulicos e do material filtrante em filtros de areia utilizados na irrigação**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, 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, 2012.

MESQUITA, M.; de Deus, F. P.; Testezlaf, R.; Diotto, A. V. Removal efficiency of pressurized sand filters during the filtration process. **Desalination and water treatment: science and engineering**, 2019a.

MESQUITA, M.; de Deus, F. P.; Testezlaf, R.; da Rosa, L. M.; Diotto, A. V. Design and hydrodynamic performance testing of a new pressure sand filter diffuser plate using numerical simulation. **Biosystems Engineering**, v. 183, p. 58-69, 2019b.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. **Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity**. Transactions of the ASAE, v. 24, n. 1, p. 77-0080, 1981.

PUIG-BARGUÉS, J. P.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R. Effluent particle removal by microirrigation system filters. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 3, n. 2, p. 182-191, 2005.

PUJOL, T.; PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; CHAVES, M.; DURAM-ROS, M.; PUJOL, J.; CARTAGENA, F. R. de. Numerical Study of the Hydraulic Effects of Modifying the Outlet Pipe and Diffuser Plate in Pressurized Sand Filters with Wand-Type Underdrains. **Journal of the ASABE**, v. 65, n. 3, p. 609-619, 2022.

RAMIREZ, J. C. S. **Efeito das características granulométricas e da altura da camada filtrante no processo de retrolavagem em filtros de areia.** 2010. 159p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

RAMIREZ, J.C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1226-1237, 2011.

SANTOS, M. B.; MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R. Aplicação de túnel de vento na avaliação de linhas de fluxo geradas por crepinas de filtros de areia. **Engenharia Agrícola**, v.33, n.3, p.548-559, 2013.

STADEN, S. J. V.; HAARHOFF, J.A standard test for filter media cleanliness. **Water SA**, v. 30, n. 1, p. 81-88, 2004.

TESTEZLAF, R. Técnicas de filtragem para irrigação. In: Simpósio de Citricultura Irrigada, 6., 2006, Bebedouro. **Anais...** Bebedouro, SP: GTACC, 2006. p. 1-43.

TESTEZLAF, R. Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática. **Revista Engenharia Agrícola**, v.28, n.3, p.604-613, 2008.

TESTEZLAF, R.; de DEUS, F. P.; MESQUITA, M. **Filtros de areia na irrigação localizada.** Campinas: Unicamp, 2014. 66p.

VERMEREIN, L.; JOBLING, G. A. Localized Irrigation. **Irrigation and Drainage Paper.** Rome: FAO, 1984. 203p.

WAKEMAN, R. The influence of particle properties on filtration. **Separation and purification technology.** v. 58, p. 234-241, 2007.

WIECHETECK, G. K. **Influência do método de lavagem nas características de carvões antracitoso e betuminoso utilizados em meio filtrante.** 1996.

SEGUNDA PARTE

ARTIGOS

Primeiro artigo:

**Influência do modelo construtivo de placa difusora no comportamento hidráulico da
filtração em filtro de areia pressurizado**

Influence of the construction model of the diffuser plate on the hydraulic behavior of
the filtration in a pressurized sand filter

Artigo redigido nas normas da revista científica Biosystems Engineering, ISSN: 1537-5110
(versão preliminar)

Influência do modelo construtivo de placa difusora no comportamento hidráulico da filtração em filtro de areia pressurizado

Gabriel Dlouhy Alcon^a, Fábio Ponciano de Deus^a, Adriano Valentim Diotto^a, Michael Silveira Thebaldi^a, Marcio Mesquita^b, Yimga Nana^a, Nicolas Antônio Baptistella Zueleta^a

^a Universidade Federal de Lavras, Departamento de Recursos Hídricos, 3037, Lavras, Mg, Brasil

^b Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil

Resumo

Alguns trabalhos mostraram a influência do projeto de placas difusora de filtros de areia pressurizados na deformação da superfície da camada filtrante no processo de filtração, além de diferenciação do comportamento hidráulico do processo, podendo interferir na capacidade de remoção do equipamento. Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do modelo construtivo de placa difusora no comportamento hidráulico e na deformação da superfície da camada filtrante, no processo de filtração de um modelo comercial de filtro de areia pressurizado. Adicionalmente objetivou-se avaliar a possibilidade de utilização de modelo de placa difusora desenvolvido através da fluidodinâmica computacional, adaptado para às dimensões do modelo comercial de filtro de areia avaliado. O experimento foi realizado em módulo hidráulico construído em circuito fechado de circulação da água, utilizando água de abastecimento público. Realizou-se a avaliação de dois modelos de placa difusora, combinados com duas alturas de camada filtrante e sete taxas de filtração. A perda de pressão produzida pela placa difusora original na condição de filtro vazio apresentou os maiores valores para todas as taxas de filtração avaliadas, contudo na condição de filtro de areia preenchido com camada filtrante observou-se aparente igualdade de comportamento em relação à placa proposta, indicando influência do modelo de placa no comportamento hidráulico do equipamento. A deformação da superfície da camada filtrante ocorreu em todos os modelos de placa difusora avaliados, não ficando evidente a diferenciação entre os modelos. A adaptação de uma placa difusora dimensionada em condições específicas, apesar de não ter atingido o mesmo resultado relatado no trabalho de origem da placa, atingiu melhores resultados que a placa difusora original.

Palavras-chave: Perda de pressão, irrigação localizada, entupimento de emissores.

1 Introdução

A irrigação localizada é conhecida como o método que possui elevada eficiência no uso da água e da energia. Entretanto, devido ao reduzido diâmetro das saídas de água, associado ao uso de águas com sólidos em suspensão, eleva-se a possibilidade de ocorrência de entupimentos, afetando a taxa e a uniformidade de aplicação de água do sistema, elevando os custos de manutenção e substituição de equipamentos (Frizzone et al., 2012; Nakayama & Buks, 1981).

Para reduzir as ocorrências de entupimento dos emissores na irrigação localizada, o tratamento físico da água é o principal procedimento utilizado, sendo recomendado para a remoção dos sólidos em suspensão na água (Tezteslaf et al., 2008). Dentre os equipamentos utilizados na agricultura irrigada, o filtro de areia destaca-se na remoção de matéria orgânica, e por possuir maior faixa de remoção de partículas de diferentes dimensões quando comparado aos filtros de tela e disco (Tezteslaf et al., 2014; Keller e Bliesner, 1990; Haman et al., 1994; Tezteslaf, 2008).

Os filtros de areia pressurizados, utilizados na irrigação, são tanques metálicos preenchidos com meio filtrante, sendo normalmente a areia sílica. Duas operações definem o funcionamento desse equipamento (filtração e retrolavagem). A filtração trata-se do processo de remoção das partículas sólidas em suspensão no afluente, através de sua passagem forçada pelo meio filtrante que normalmente ocorre no sentido descendente (Mesquita et al., 2019a). Com a ocorrência da contaminação da camada filtrante, aumentando a perda de pressão no processo de filtração, posteriormente é necessária a realização de sua limpeza, processo este denominado por retrolavagem (Tezteslaf et al. 2008; de Deus et al., 2020).

Internamente o filtro de areia é composto por placa difusora e sistema de drenagem, sendo estruturas fundamentais na operação do equipamento, cuja diferenciação nos projetos determinam diferentes comportamentos hidráulicos (Pujol et al., 2022). Na parte superior do equipamento, abaixo da entrada de água, encontra-se a placa difusora, que é responsável por reduzir a energia cinética do fluxo, e distribuir a água de forma uniforme na superfície da camada filtrante (Mesquita et al. 2012; Mesquita et al. 2019a, Abart et al., 2011). Na parte de baixo do equipamento encontra-se o sistema de drenagem, que é responsável no processo de filtração por permitir a passagem da água filtrada para o sistema de irrigação, impedindo a passagem de partículas do meio filtrante. No processo de retrolavagem o sistema de drenagem permite a entrada da água no filtro no sentido ascendente, proporcionando a expansão da camada filtrante e a remoção dos contaminantes aderidos (de Deus et al., 2020, de Deus et al., 2016; Mesquita et al., 2017; Salcedo et al., 2011).

O correto desenvolvimento das estruturas que compõem o filtro de areia é fundamental para atingir a eficácia adequada nas operações do equipamento, garantindo menor perda de pressão e maior remoção de contaminantes (Bové et al., 2017; Mesquita et al., 2017; Mesquita et al., 2019a; Pujol et al., 2022). Especificamente em relação à placa difusora, Mesquita et al. (2019a) salientaram a significativa influência do modelo de placa difusora no comportamento hidráulico do processo de filtração em filtros de areia pressurizados. Os autores observaram comportamentos diferentes nas linhas de fluxo produzidas, onde o modelo desenvolvido com auxílio das ferramentas da fluidodinâmica computacional (CFD) produziu experimentalmente as menores perdas energéticas e deformações da superfície da camada filtrante. Em experimento desenvolvido por Deus et al. (2013) observou-se diferenciação na deformação da superfície da camada filtrante com a mudança do modelo de placa difusora, resultando que as placas difusoras que produziram a menor deformação determinaram a menor perda de pressão no processo de filtração.

Com base no exposto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do modelo construtivo de placa difusora no comportamento hidráulico e na deformação da superfície da camada filtrante, no processo de filtração de um modelo comercial de filtro de areia pressurizado. Adicionalmente objetivou-se avaliar a possibilidade de utilização de modelo de placa difusora desenvolvido por meio da fluidodinâmica computacional, adaptado para às dimensões do modelo comercial de filtro de areia avaliado.

2 Material e métodos

2.1 Módulo hidráulico

Para o desenvolvimento da pesquisa, construiu-se um módulo hidráulico em circuito fechado de circulação de água (Figura 1). O módulo hidráulico foi composto pelos seguintes equipamentos: - um modelo comercial de filtro de areia pressurizado da marca Hidrosolo (modelo FA07), na Tabela 1 são apresentadas as especificações técnicas do modelo de filtro de areia avaliado; - um sensor de vazão do tipo rotor (GF Signet, modelo 3-2536-P0) com $\pm 1\%$ de linearidade e $\pm 0.5\%$ de repetibilidade a 25°C ; - dois registros instalados antes e após o filtro para controle do fluxo; - duas tomadas de pressão do tipo integral instaladas antes e após o filtro; - um transdutor de pressão diferencial MPX5700DP (Freescale Semi-conductor Brasil, Campinas, São Paulo, Brasil), com $\pm 2.5\%$ de acurácia, conectado às duas tomadas de pressão do tipo integral, possibilitando a aferição da perda de pressão do equipamento; - um reservatório de água; - uma

motobomba da marca Schneider (modelo BC – 22R 1¼” 7.5 cv Trifásico 60 Hz 220/380 V); - uma placa de aquisição de dados Campbell Scientific (modelo CR10), para a coleta e armazenamento dos dados de vazão e diferencial de pressão; - um computador para visualização em tempo real dos dados coletados. O sensor de vazão e as tomadas de pressão do tipo integral foram instalados a uma distância, das curvas e registros, de cinco vezes o diâmetro da tubulação, de acordo com as recomendações da norma ASABE (2008).

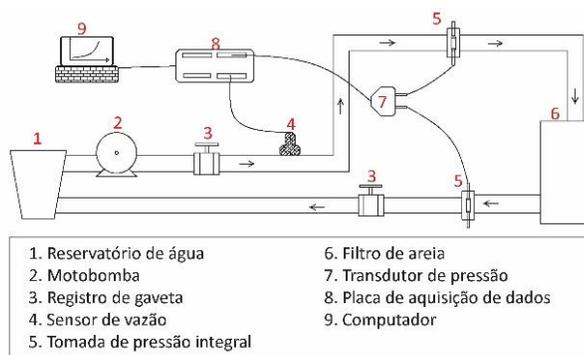


Figura 1 - Módulo hidráulico em circuito fechado de circulação da água, com detalhe do sentido do fluxo e dos equipamentos utilizados nos ensaios experimentais.

Tabela 1 - Especificações técnicas do filtro de areia Hidrosolo (modelo FA07).

| Especificação | Valor |
|---|-------|
| Diâmetro do corpo do filtro (mm) | 400 |
| Área transversal de filtração (m ²) | 0.125 |
| Diâmetro interno da tubulação de entrada (mm) | 50.8 |
| Diâmetro interno da tubulação de saída (mm) | 50.8 |
| Altura útil do filtro ¹ (mm) | 600 |

¹ Distância entre a base da placa difusora e o nível superior dos drenos.

2.2 Meio filtrante e altura da camada

Utilizou-se como meio filtrante a areia sílica. O material possuía diâmetro médio efetivo (D_{10}) de 0.41 ± 0.01 mm e coeficiente de uniformidade médio (CU) de 1.65 ± 0.03 . Essa granulometria foi selecionada por ter proporcionado os melhores resultados de remoção de sólidos em suspensão relatados no trabalho de Mesquita et al. (2019b).

Foram avaliadas duas alturas de camada filtrante ($H_1=22.5$ cm, e $H_2=45$ cm – limite recomendado pelo fabricante). O objetivo foi verificar a influência da proximidade da camada filtrante à placa difusora na deformação da superfície, e conseqüentemente na perda de pressão do processo de filtração, como salientado nos trabalhos de Deus et al. (2013) e Mesquita et al. (2019a).

2.3 Modelos de placa difusora

Avaliou-se dois modelos construtivos de placa difusora (Figura 2), sendo: - PP (placa difusora proposta por Mesquita et al. (2019a), com dimensões adaptadas ao diâmetro do filtro avaliado); e PO (placa difusora plana ou original do fabricante). É importante salientar que após avaliações realizadas no trabalho de Deus et al. (2013) a empresa comercializa outro modelo de placa difusora.

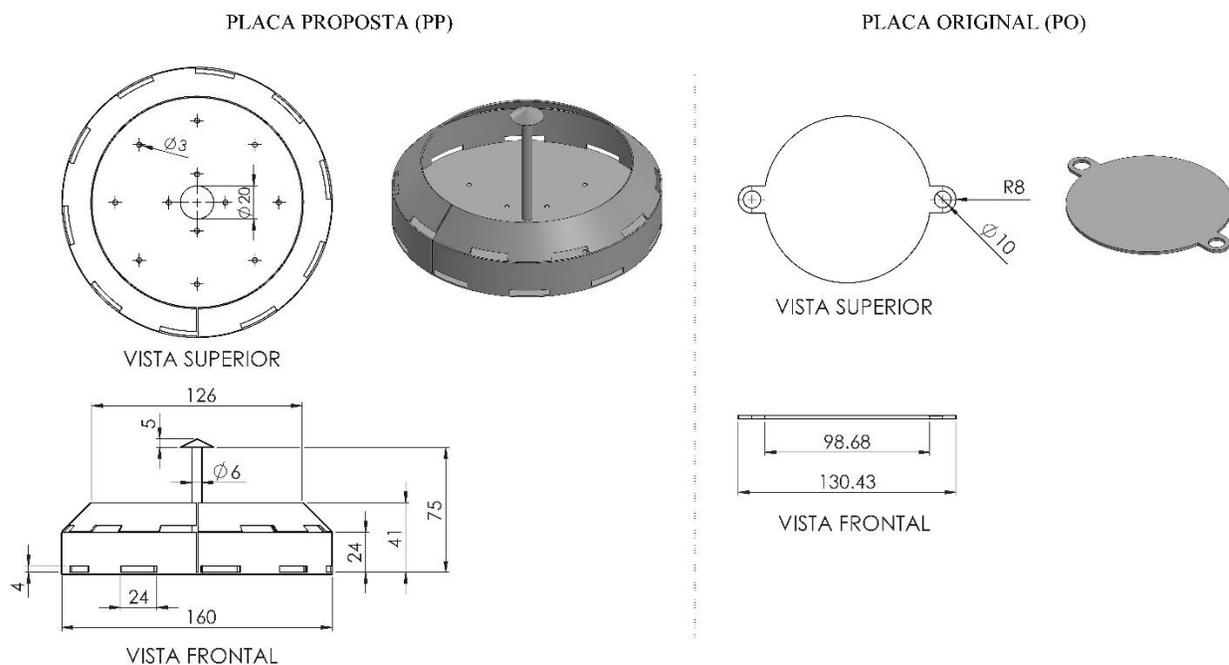


Figura 2 - Detalhe construtivo das placas difusoras avaliadas, com dimensões em milímetros.

A placa PP possui a mesma geometria da placa desenvolvida por Mesquita et al. (2019a), porém com dimensões proporcionais ao diâmetro do filtro de areia avaliado (proporção de 40 cm por 50 cm). Além de comparar o efeito na deformação da superfície da camada filtrante e na perda de pressão do processo de filtração entre as placas, o uso da placa PP teve o objetivo de avaliar a possibilidade de adaptação em outros modelos de filtros, tendo o mesmo benefício na redução da deformação da superfície da camada filtrante e na redução da perda de pressão.

A placa PP foi instalada a 150 mm da entrada de água do filtro, de acordo com recomendação de Mesquita et al. (2019a). Já a placa PO foi instalada a 60 mm, de acordo com o padrão de instalação do fabricante.

2.4 Ensaios experimentais e caracterização hidráulica

Os ensaios experimentais foram realizados utilizando água de abastecimento público (água sem sólidos em suspensão), com o intuito de não haver alteração da perda de pressão no decorrer do tempo. Os ensaios foram realizados nas condições de filtro vazio (sem meio filtrante), bem como de filtro preenchido com meio filtrante (areia sílica) nas alturas H1 (22.5 cm) e H2 (45 cm). Em cada condição, avaliou-se as duas placas difusoras (PP e PO), nas taxas de filtração (TF) de 20, 30, 40, 50, 60, 75 e 100 m³ m⁻² h⁻¹ (TF20, TF30, TF40, TF50, TF60, TF75, e TF100 respectivamente). Cada combinação experimental apresentou três repetições, com duração de cinco minutos cada ensaio. Na condição de filtro vazio foram realizados um total de 42 ensaios (2 placas x 7 taxas de filtração x 3 repetições). Já na condição de filtro preenchido com camada filtrante realizou-se 84 ensaios (2 alturas de camada filtrante x 2 placas x 7 taxas de filtração x 3 repetições). A caracterização hidráulica do processo de filtração foi realizada aferindo a perda de pressão para as diferentes combinações experimentais.

O objetivo de avaliar o filtro de areia nas condições de filtro vazio e preenchido com meio filtrante é de contabilizar a influência da camada filtrante na perda de pressão do processo de filtração (perda de pressão produzida pela camada filtrante), bem como da influência indireta do modelo de placa difusora na alteração da superfície da camada filtrante e conseqüentemente no comportamento hidráulico do filtro. A equação 1 foi utilizada para estimar a perda de pressão da camada filtrante (ΔP_{leito}), e a equação 2 foi utilizada para estimar o percentual de perda de pressão da camada filtrante (P_{leito}).

$$\Delta P_{leito} = \Delta P_{total} - \Delta P_{vazio} \quad (1)$$

Onde: ΔP_{leito} – perda de pressão da camada filtrante (kPa); ΔP_{total} – perda de pressão do filtro de areia preenchido com meio filtrante (kPa); e ΔP_{vazio} – perda de pressão do filtro de areia vazio (kPa).

$$P_{leito} = \frac{(\Delta P_{total} - \Delta P_{vazio})}{\Delta P_{total}} \times 100 \quad (2)$$

Onde: P_{leito} - percentual de perda de pressão da camada filtrante (%).

2.5 Deformação da superfície da camada filtrante

Concomitantemente aos ensaios de caracterização hidráulica do equipamento, avaliou-se a deformação da superfície da camada filtrante em todas as repetições experimentais, nas duas alturas de camada filtrante (H1 e H2) combinadas com as taxas de filtração TF20, TF60 e TF100.

A deformação da superfície da camada filtrante foi registrada pela medição da distância da superfície em relação a um plano de referência fixo (base da placa difusora), em toda a extensão da superfície. Para isso, foi desenvolvido um dispositivo composto por sensores de distância a laser (marca OEM, modelo V15310X), cuja movimentação ocorria com o auxílio de um motor de passo (marca ROHS, modelo 28BYJ-48), possibilitando a movimentação radial (da extremidade até o centro) e angular (64 passos em 360°). A Figura 3 apresenta a localização da instalação do dispositivo, bem como as dimensões do mesmo.

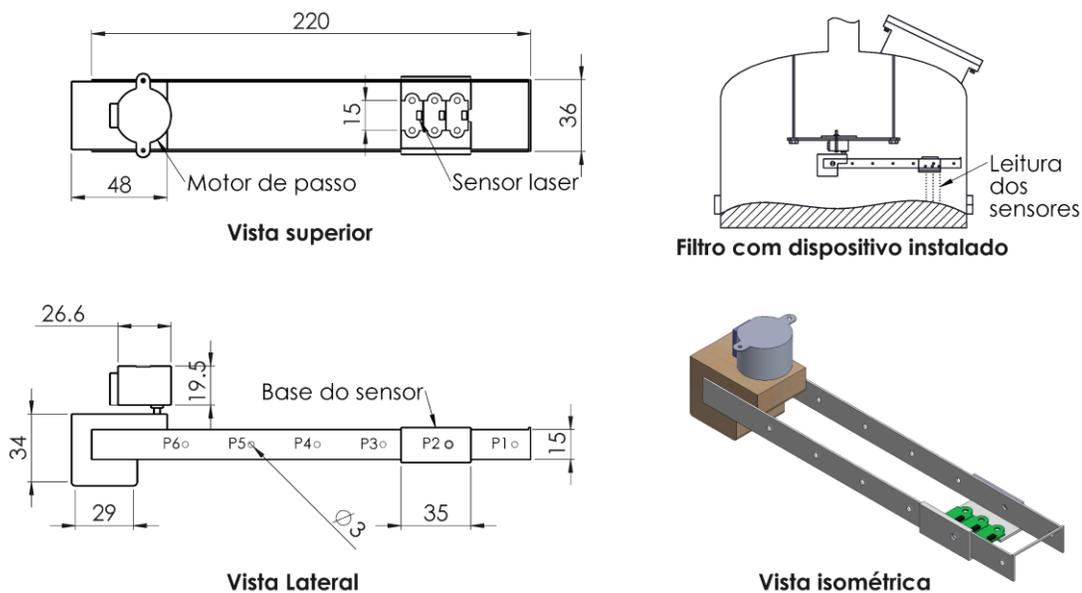


Figura 3 - Detalhe da localização do dispositivo no ensaio de avaliação da deformação da superfície da camada filtrante, bem como detalhe das dimensões do dispositivo (unidade: mm).

As posições radiais onde ocorreram as leituras foram pré-definidas (pontos p1, p2, p3, p4, p5 e p6). Cada combinação experimental gerou 1152 pontos de medição. Os dados gerados foram manipulados para a obtenção das cotas de cada ponto, tendo como referência o nível superior dos drenos. Posteriormente utilizou-se o programa Surfer versão 18 (Golden Software LCC) para gerar superfícies tridimensionais da superfície da camada filtrante, sendo a deformação da superfície avaliada visualmente.

2.6 Análise dos dados

A perda de pressão foi ajustada em função da taxa de filtração realizando-se a análise de regressão a 5% de significância ($P \leq 0.05$). Os fatores qualitativos (altura da camada filtrante e o modelo de placa difusora) foram analisados aplicando teste Tukey ($P \leq 0.05$). O software Sigmaplot 11.0 foi utilizado para auxiliar nas análises.

A deformação da superfície da camada de areia foi analisada graficamente, verificando a influência dos fatores de variação do experimento (taxa de filtração, modelo de placa difusora e altura da camada filtrante).

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização hidráulica dos filtros de areia vazios

Na Tabela 2 é apresentado o resumo da análise de regressão do ajuste dos dados de perda de pressão do filtro de areia vazio em função da taxa de filtração ao modelo exponencial, e na Figura 4 é ilustrado o seu comportamento.

Tabela 2 - Resumo da análise de regressão do ajuste dos dados de perda de pressão do filtro de areia vazio (ΔP_{vazio} - kPa) em função da taxa de filtração ($TF - m^3 m^{-2} h^{-1}$) ao modelo exponencial, para os diferentes modelos de placa difusora¹.

| Modelo matemático | Modelo de placa difusora | |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|
| | Proposta (PP) | Original (PO) |
| Exponencial | 533.00* ($R^2=98.3\%$) | 373.04* ($R^2=93.71\%$) |

¹* - significativo a 5% de probabilidade; ns – não significativo a 5% de probabilidade.

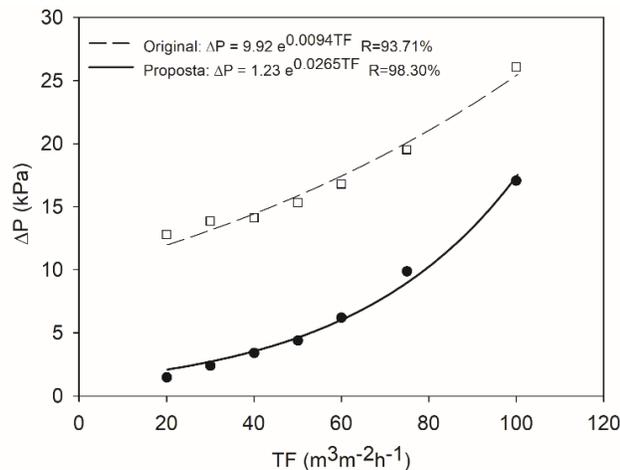


Figura 4 - Comportamento da perda de pressão do filtro vazio (ΔP_{vazio} - kPa) em função da taxa de filtração ($TF - m^3 m^{-2} h^{-1}$), para os diferentes modelos de placa difusora avaliados.

O comportamento da perda de pressão em função da taxa de filtração é representado pelo modelo matemático exponencial, com coeficiente de determinação ($R^2 \geq 93\%$). Em trabalho desenvolvido por de Deus et al. (2013) e Mesquita et al. (2012) o modelo exponencial também representou o comportamento dos dados de perda de pressão em função da taxa de filtração para diferentes modelos comerciais de filtros de areia operando em filtração.

É possível observar diferenciação dos valores de perda de pressão entre as placas PP (proposta) e PO (original) com o aumento da taxa de filtração, onde apesar da placa PO ter apresentado os maiores valores, apresentou a menor taxa de incremento da perda de pressão com a taxa de filtração.

Com o intuito de avaliar estatisticamente a influência da placa difusora na perda de pressão do filtro vazio, na Tabela 3 é apresentado o resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para cada taxa de filtração avaliada.

Tabela 3 - Resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) comparando os modelos de placa difusora para os dados de perda de pressão do filtro de areia vazio (ΔP_{vazio} - kPa), para cada taxa de filtração avaliada ($TF - m^3 m^{-2} h^{-1}$)¹.

| Modelo de placa | Taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) | | | | | | |
|-----------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | TF20 | TF30 | TF40 | TF50 | TF60 | TF75 | TF100 |
| Proposta (PP) | 1.47±0.81b | 2.4±0.87b | 3.40±0.69b | 4.40±0.40b | 6.20±0.20b | 9.87±0.11b | 17.07±0.11b |
| Original (PO) | 12.80±1.39a | 13.87±2.04a | 14.13±0.81a | 15.33±0.92a | 16.80±0.20a | 19.53±0.31a | 26.07±0.11a |

¹letras minúsculas diferentes na vertical diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança do tipo de placa difusora.

Comparando as estruturas dos modelos de placa difusora apresentado na Figura 2, esperava-se que a placa proposta (PP) determinasse maior resistência ao escoamento, e conseqüentemente maiores valores de perda de pressão. Contudo, observou-se que para todas as taxas de filtração a placa original (PO) produziu valores significativamente ($P \leq 0.05$) maiores de perda de pressão na condição de filtro vazio em relação à placa proposta (PP). Nesse sentido, supõe-se que as linhas de fluxo produzidas pela placa difusora original (PO) produziu maior resistência ao escoamento, sintoma característico da produção de vórtices.

Utilizando o mesmo modelo de placa difusora, Mesquita et al. (2019a) constataram utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD) que a placa apresentou menor ocorrência de vórtices, resultando em menor perda de pressão no escoamento. de Deus et al. (2013) também

constatarem experimentalmente a influência do modelo de placa difusora na perda de pressão do processo de filtração em filtros de areia. Pujol et al. (2022) constataram também utilizando CFD otimização na uniformidade do fluxo e diminuição dos vórtices da água acima da superfície da camada filtrante utilizando modelo de placa difusora adequadamente projetada.

3.2 Caracterização hidráulica dos filtros de areia preenchidos com areia

Na Tabela 4 é apresentado o resumo da análise de regressão do ajuste dos dados de perda de pressão do filtro preenchido com meio filtrante (ΔP_{total}) ao modelo exponencial em função da taxa de filtração, para as diferentes combinações de altura de camada filtrante e modelos de placa difusora. Na Figura 5 é ilustrado o seu comportamento.

Tabela 4 - Resumo da análise de regressão do ajuste dos dados de perda de pressão do filtro de areia preenchido com meio filtrante (ΔP_{total} - kPa) em função da taxa de filtração ($TF - m^3 m^{-2} h^{-1}$) ao modelo exponencial, para diferentes alturas de camada filtrante e modelos de placa difusora.¹

| Modelo de placa difusora | Altura da camada filtrante | Quadrado médio |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Proposta (PP) | H1 | 2549.45* (R ² =97.82%) |
| | H2 | 6559.48* (R ² =98.14%) |
| Original (PO) | H1 | 2032.61* (R ² =96.77%) |
| | H2 | 5375.41* (R ² =98.71%) |

¹* - significativo a 5% de probabilidade; ns – não significativo a 5% de probabilidade.

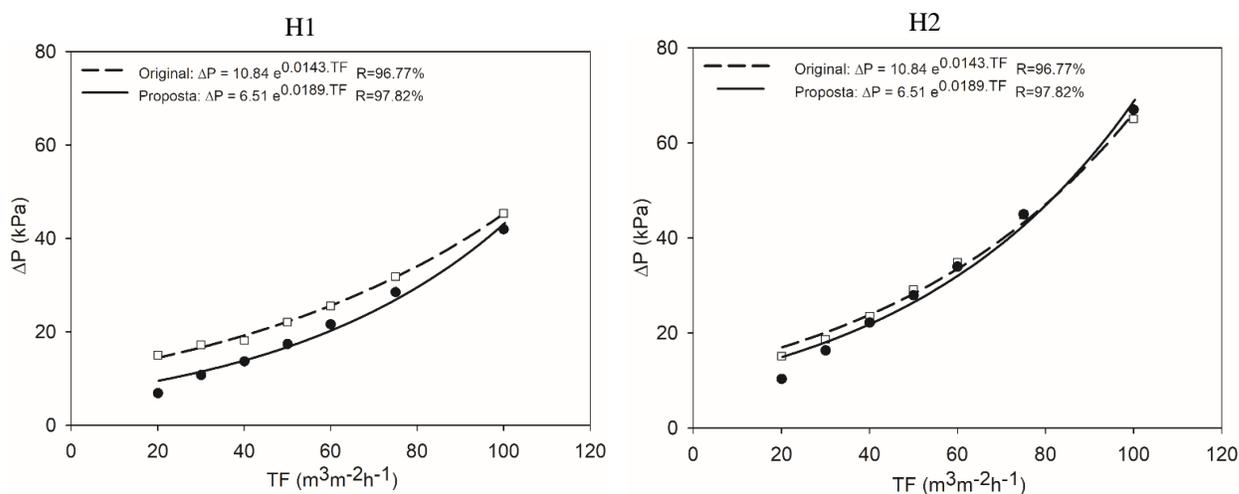


Figura 5 - Comportamento da perda de pressão do filtro de areia preenchido com meio filtrante (ΔP_{total} - kPa) em função da taxa de filtração ($TF - m^3 m^{-2} h^{-1}$) para as diferentes combinações de modelos de placa difusora e alturas de camada filtrante.

Observou-se para todos os modelos de placa difusora que o aumento da altura da camada filtrante aumentou visivelmente a inclinação das curvas. Adicionalmente é possível observar diferenciação entre os modelos de placa difusora na altura H1 (original > proposta), sendo menos visível na altura H2 (original = proposta). De maneira geral esperava-se manter o mesmo padrão de comportamento da condição de filtro vazio (Figura 4), contudo observou-se redução da diferença entre as placas, com maior perda de pressão proporcionada pela camada filtrante no uso da placa proposta.

Com o intuito de avaliar estatisticamente a influência de cada fator, na Tabela 5 é apresentado o resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de ΔP_{total} para cada combinação experimental (modelo de placa difusora e altura da camada filtrante).

Tabela 5 - Resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) avaliando a influência dos diferentes modelos de placa difusora e alturas de camada filtrante, para os dados de perda de pressão do filtro preenchido com meio filtrante (ΔP_{total} - kPa) para cada taxa de filtração avaliada ($TF - m^3 m^{-2} h^{-1}$)¹.

| Taxa de filtração | Modelo de placa difusora | Altura da camada filtrante | |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|---------------|
| | | H1 | H2 |
| TF20 | Proposta (PP) | 6.87±0.7 bB | 10.33±0.58 bA |
| | Original (PO) | 15.0±2.0 aA | 15.13±3.69 aA |
| TF30 | Proposta (PP) | 10.70±0.8 bB | 16.30±0.58 bA |
| | Original (PO) | 17.20±4.9 aA | 18.70±1.15 aA |
| TF40 | Proposta (PP) | 14.90±1.8 bB | 22.20±0.35 aA |
| | Original (PO) | 18.13±1.03 aB | 23.53±0.50 aA |
| TF50 | Proposta (PP) | 17.40±1.39 bB | 27.93±0.11 aA |
| | Original (PO) | 22.07±0.11 aB | 29.07±0.11 aA |
| TF60 | Proposta (PP) | 21.60±1.20 bB | 34.00±0.00 aA |
| | Original (PO) | 25.60±0.40 aB | 34.87±0.11 aA |
| TF75 | Proposta (PP) | 28.47±0.60 aB | 45.00±0.00 aA |
| | Original (PO) | 31.80±0.53 aB | 44.93±0.11 aA |
| TF100 | Proposta (PP) | 42.00±0.20 aB | 67.00±0.00 aA |
| | Original (PO) | 45.40±0.20 aB | 65.07±0.11 bA |

¹letras minúsculas diferentes na vertical, e letras maiúsculas diferentes na horizontal, diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança do tipo de placa difusora e da altura da camada filtrante respectivamente.

No uso da placa difusora proposta, em todas as taxas de filtração o aumento da altura da camada filtrante determinou incremento significativo ($P \leq 0.05$) da ΔP_{total} . No uso da placa difusora "original" o aumento ocorreu a partir da taxa TF40.

Considerando fixa a altura H1, é possível observar influência significativa ($P \leq 0.05$) do modelo de placa difusora para quase todas as taxas de filtração (exceto para TF75 e TF100), com a placa original produzindo os maiores valores de ΔP_{total} quando comparada à placa difusora proposta. Já fixando a altura de camada filtrante H2, observou-se que a placa original apresentou maiores valores em relação à proposta para TF20 e TF30, igualdade entre as placas para TF40, TF50, TF60 e TF75, e para TF100 a placa proposta apresentou maior valor em relação à placa original.

Para se compreender a influência da interação entre placas difusoras, altura da camada filtrante e taxa de filtração, é apresentado na Figura 6 o comportamento da relação entre perda de pressão no uso da placa original e no uso da placa proposta (percentual entre PO e PP).

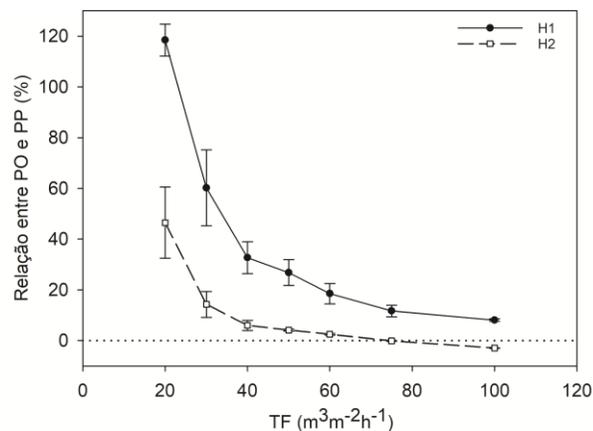


Figura 6 – Relação entre ΔP_{total} utilizando a placa difusora original (PO) e a placa proposta (PP) para as diferentes alturas de camada filtrante e taxas de filtração avaliadas.

É possível observar que para as duas alturas avaliadas a relação entre PO e PP diminuiu com o incremento da taxa de filtração, havendo uma tendência de estabilização das diferenças. No uso da altura H1 ficou evidente a diferenciação das placas difusoras ($PO > PP$), sendo maiores as diferenças nas menores taxas de filtração. Já no uso da altura H2, as diferenças diminuiram, com tendência à igualdade entre as placas com o aumento da taxa de filtração.

Em resumo, foi possível observar menor influência da camada filtrante na perda de pressão do filtro no uso da placa original em comparação à placa proposta, que produziu maior incremento

de perda de pressão na condição de filtro preenchido com meio filtrante. Em tese, pode-se supor maior homogeneidade na distribuição das linhas de fluxo pela placa proposta, obtendo-se maior área superficial efetiva na filtração, e conseqüentemente maior perda de pressão do leito filtrante. Essa observação está em consonância com as observações de Mesquita et al., (2019a), que utilizando fluidodinâmica computacional afirmam que projetos de placas difusoras que favorecem a homogeneidade do fluxo, e diminuem a ocorrência de vórtices, podem produzir maiores perdas de pressão promovidas pela camada filtrante. Nesse sentido, pode-se supor que a placa difusora proposta adaptada às dimensões do filtro apresentou um bom resultado em termos de desempenho hidráulico, podendo representar um bom produto na remoção de contaminantes.

3.3 Perda de pressão do leito filtrante

Na Tabela 6 é apresentado o resumo da análise de regressão do ajuste dos dados de perda de pressão produzido pelo leito filtrante (ΔP_{leito}) ao modelo exponencial em função da taxa de filtração. Na Figura 6 é ilustrado o seu comportamento.

Tabela 6 - Resumo da análise de regressão do ajuste dos dados de perda de pressão proporcionada pelo leito filtrante (ΔP_{leito} - kPa) em função da taxa de filtração (TF - $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$), para diferentes alturas de camada filtrante e modelos de placa difusora¹.

| Modelo de placa difusora | Altura da camada filtrante | Quadrado médio |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Proposta (PP) | H1 | 2352.08* ($R^2=93.29\%$) |
| | H2 | 3368.37* ($R^2=96.89\%$) |
| Original (PO) | H1 | 1020.67* ($R^2=85.84\%$) |
| | H2 | 4135.07* ($R^2=95.10\%$) |

¹* - significativo a 5% de probabilidade; ns – não significativo a 5% de probabilidade.

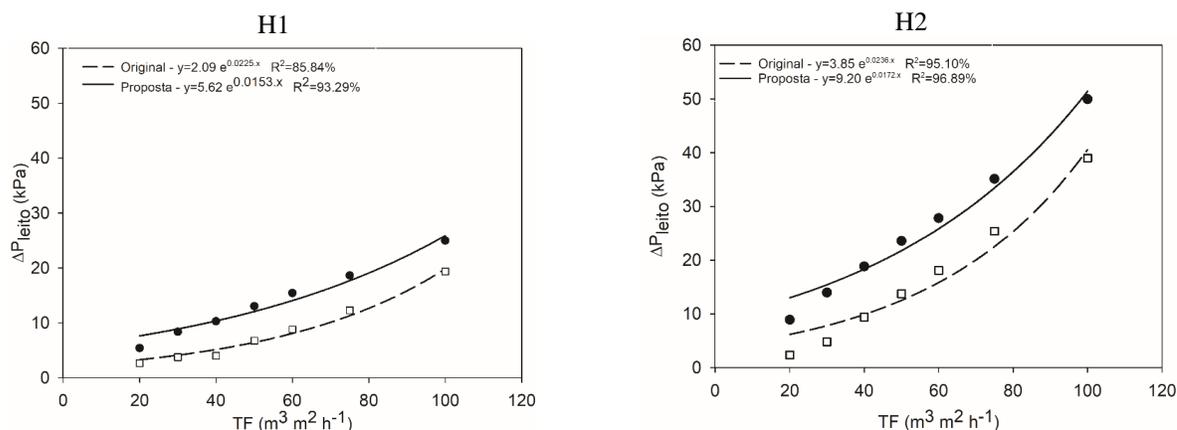


Figura 6 - Comportamento da perda de pressão proporcionada pelo leito filtrante (ΔP_{leito}) em função da taxa de filtração (TF - $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) para as diferentes combinações de modelos de placa difusora e alturas de camada filtrante.

É possível observar para todos os modelos de placa difusora aumento da inclinação das curvas de perda de pressão com o aumento da altura da camada filtrante. Para ambas as alturas de camada filtrante é possível observar que o uso do modelo de placa difusora proposta determinou a ocorrência dos maiores valores de perda de pressão do leito filtrante.

Na Tabela 2 é apresentado o resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) aplicado aos dados de perda de pressão do leito filtrante para as diferentes combinações de modelos de placa difusora e alturas de camada filtrante.

Tabela 2 - Resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) comparando os diferentes modelos de placa difusora e as alturas de camada filtrante para os dados de perda de pressão do leito filtrante (ΔP_{leito} - kPa) para cada taxa de filtração avaliada ($\text{TF} - \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

| Taxa de filtração | Modelo de placa difusora | Altura da camada filtrante | |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|---------------|
| | | H1 | H2 |
| TF20 | Proposta (PP) | 5.40±1.11 aB | 8.87±1.21 aA |
| | Original (PO) | 2.67±2.51 aA | 2.33±2.3 bA |
| TF30 | Proposta (PP) | 8.33±1.68 aB | 13.93±1.22 aA |
| | Original (PO) | 3.73±5.78 aA | 4.80±0.92 bA |
| TF40 | Proposta (PP) | 10.27±1.62 aB | 18.80±0.92 aA |
| | Original (PO) | 4.00±1.40 bB | 9.40±0.35 bA |
| TF50 | Proposta (PP) | 13.00±1.44 aB | 23.53±0.42 aA |
| | Original (PO) | 6.73±0.99 bB | 13.73±0.81 bA |
| TF60 | Proposta (PP) | 15.4±1.39 aB | 27.80±0.20 aA |
| | Original (PO) | 8.80±0.35 bB | 18.07±0.20 bA |
| TF75 | Proposta (PP) | 18.60±0.72 aB | 35.13±0.11 aA |
| | Original (PO) | 12.27±0.23 bB | 25.40±0.20 bA |
| TF100 | Proposta (PP) | 24.93±0.23 aB | 49.93±0.11 aA |
| | Original (PO) | 19.33±0.11 bB | 39.00±0.20 bA |

Letras minúsculas diferentes na vertical, e letras maiúsculas diferentes na horizontal, diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança do tipo de placa difusora e da altura da camada filtrante respectivamente.

Em quase todas as combinações experimentais o aumento da altura da camada filtrante e o uso da placa difusora proposta determinaram os maiores valores de perda de pressão produzidos pelo leito filtrante. Observou-se exceção no uso da placa original aumentando a camada filtrante nas taxas TF20 e TF30, bem como na alteração do modelo de placa no uso da altura H1 para as mesmas taxas. Em média, a altura de camada H1 representou $73.77 \pm 4.97\%$ da perda de pressão total do filtro no uso da placa proposta, e $28.5 \pm 11.42\%$ no uso da placa original. Já o uso da altura de camada H2 representou $82.02 \pm 4.23\%$ para a placa proposta, e $39.78 \pm 17.19\%$ para a placa

original. Em resultado de Abart et al. (2011) foi observado 84.6% de responsabilidade da camada filtrante na perda de pressão total do filtro de areia comercial avaliado. de Deus et al. (2013) observaram que a camada filtrante representou em média 88% da perda de pressão total do filtro.

Na Figura 7 é ilustrada a variação do percentual de perda de pressão do leito filtrante (P_{leito}) para as diferentes combinações experimentais.

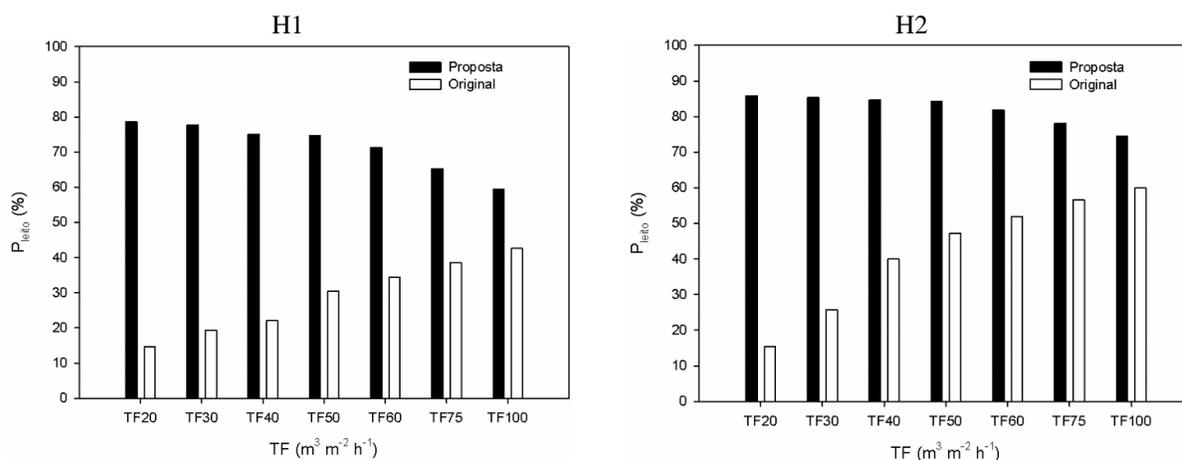


Figura 7 - Comportamento do percentual de perda de pressão causada pelo leito filtrante (P_{leito} - %) em função da taxa de filtração ($TF - m^3 m^{-2} h^{-1}$) para as diferentes combinações de altura de camada filtrante e modelos de placa difusora.

3.4 Deformação da superfície da camada filtrante

Na Figura 8 estão ilustradas as representações da deformação da superfície da camada filtrante para as alturas de camada H1 (22.5 cm) e H2 (45 cm), combinadas com os diferentes modelos de placa difusora e taxas de filtração.

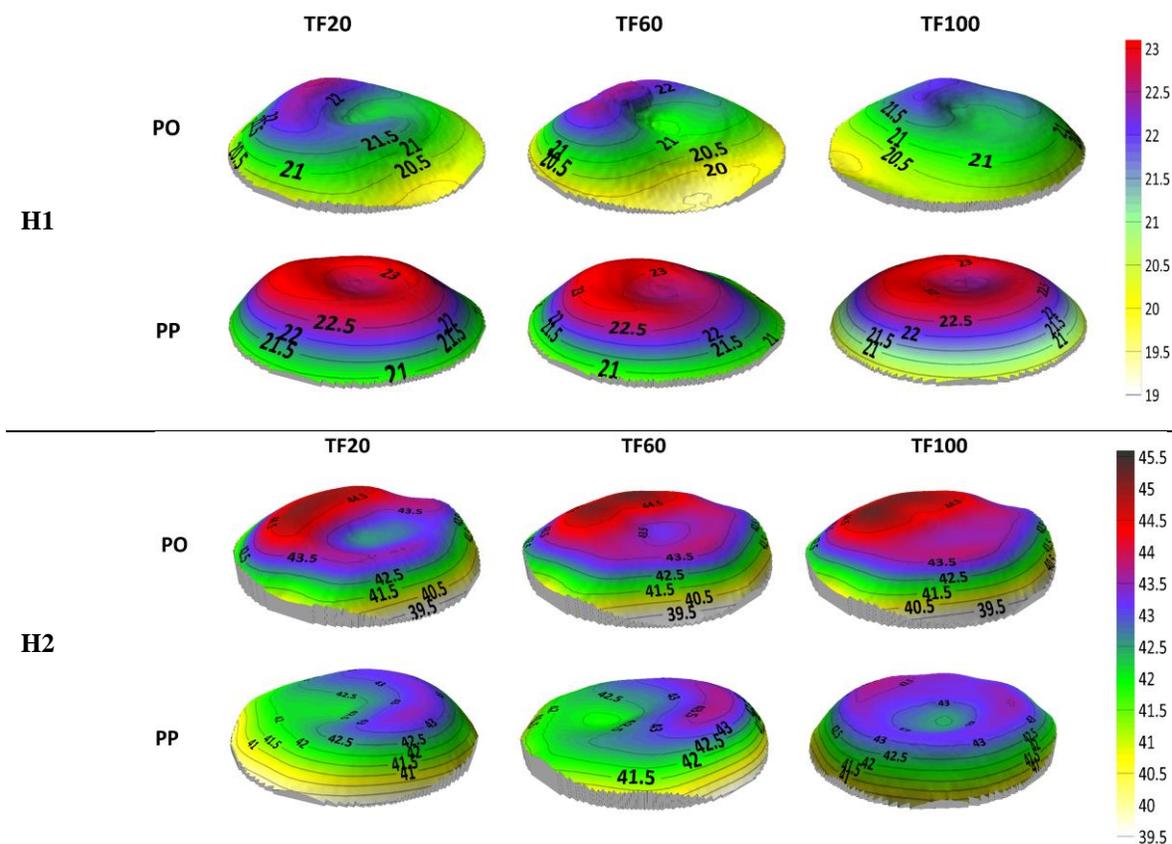


Figura 8 – Ilustração da deformação da superfície da camada filtrante para as diferentes combinações de modelo de placa difusora, taxa de filtração, e altura de camada filtrante (cotas em cm).

Em todas as combinações experimentais é possível observar alteração da superfície da camada filtrante, com a formação de depressões na proximidade da parede do filtro, e elevação da superfície na região central. Essas ocorrências também foram observadas nos trabalhos de de Deus et al. (2013) e Mesquita et al. (2019a), que salientaram que a causa advém do padrão de produção de linhas de fluxo após a colisão da água com a placa difusora, determinando a deformação da superfície da camada filtrante e a alteração do comportamento hidráulico do equipamento. Adicionalmente é possível observar diferenciação da forma da deformação entre os modelos de placa difusora, com tendência da placa “original” formar maiores elevações centrais, e a placa “proposta” apesar da formação da depressão lateral, observou-se um platô central mais uniforme.

A alteração da taxa de filtração não proporcionou modificação perceptível na superfície da camada filtrante para nenhuma combinação experimental. Por fim, foi possível perceber alteração da forma da deformação da superfície na mudança da altura da camada filtrante. Apesar da formação da elevação da superfície na região central do equipamento em todas as situações, no uso

da altura de camada filtrante H1 é possível observar a formação de uma depressão na região da elevação, que não ocorreu no uso da altura H2.

De maneira geral, é possível pressupor a influência da placa difusora na alteração das linhas de fluxo no processo de filtração, que combinadas com a altura da camada filtrante, proporciona diferenciação da deformação da superfície e conseqüentemente do comportamento hidráulico do equipamento. Essa observação também foi realizada no trabalho de Mesquita et al. (2019a), que também salientam a necessidade de avaliar o uso de determinada altura de camada filtrante com as linhas de fluxo produzidas associada a determinada taxa de filtração, combinada a determinado modelo de placa difusora.

3.5 Conclusões

A diferenciação do modelo construtivo de placa difusora alterou significativamente o comportamento hidráulico do processo de filtração em filtros de areia pressurizados, com a placa difusora adaptada ou proposta determinando as menores perdas de pressão. Essa diferenciação foi reduzida no uso da camada filtrante, resultado da diferenciação da perda de pressão provocada pelo leito filtrante para os diferentes modelos de placa difusora, com a placa proposta produzindo os maiores valores. Supõe-se que a maior homogeneidade na distribuição das linhas de fluxo pela placa proposta, obteve-se maior área superficial efetiva na filtração, e conseqüentemente maior perda de pressão do leito filtrante. Adicionalmente, o uso adaptado da placa difusora melhorou o desempenho hidráulico do equipamento, contudo não proporcionou redução visível da deformação da superfície da camada filtrante.

3.6 Referências bibliográficas

Arbat, G., Pujol, T., Puig-Barguês, J., Duran-Ros, M., Barragan, J., & Montoro, L., et al. (2011). Using computational fluid dynamics to predict head losses in the auxiliary elements of a microirrigation sand filter. *Transactions of the ASABE*, 54(4), 1367e1376. <https://doi.org/10.13031/2013.39038>.

Bové, J., Puig-Bargués, J., Arbat, G., Duran-Ros, M., Pujol, T., Pujol, J., & Ramírez de Cartagena, F. (2017). Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters. *Agric. Water Mgmt.*, 179, 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.031>

Burt, C. M. (2010). Hydraulics of commercial sand media filter tanks used for agricultural drip irrigation. Technical Report N. R10-001. Irrigation Training and Research Center (ITRC) (p. 2010). Available in: <http://www.itrc.org/reports/mediafilters.htm>. Access in: 09 may. 2022.

de Deus, F. P., Testezlaf, R., & Mesquita, M. Assessment methodology of backwash in pressurized sand filters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)*, v. 20, p. 600-605, 2016. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p600-605>.

de Deus, F. P., Testezlaf, R., & Mesquita, M. (2013). Efeito das dimensões da placa difusora no comportamento hidráulico de um modelo comercial de filtro de areia. *Engenharia Agrícola*, 33(3), 560-568. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000300012>.

Frizzone, J. A., Freitas, P. S. L. D., Rezende, R., & Faria, M. A. D. (2012). *Microirrigação: gotejamento e microaspersão*. (1 ed.). Maringá: Eduem.

Haman, D. Z., Smajstrla, A. G., & Zazueta, F. S. (1994). Media filters for trickle irrigation in Florida. Gainesville: University of Florida (Fact Sheet AE-57). Available in: <https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/WI/WI008/WI008-Drb83d4u4h.pdf>. Access in: 10 may. 2022.

Keller, J., & Bliesner, R. D. *Sprinkle and trickle irrigation*. (1990). New York: AVI book.

Mesquita, M., Testezlaf, R., de Deus, F. P., & Rosa, L. M. Characterization of Flow Lines Generated by Pressurized Sand Filter Underdrains. *Chemical Engineering Transactions*, v. 58, p. 715-720, 2017. <https://doi.org/10.3303/CET1758120>.

Mesquita, M., Testezlaf, R., & Salcedo Ramirez, J. C. (2012). The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. *Agricultural Water Management*, 115, 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.09.003>.

Mesquita, M., de Deus, F. P., Testezlaf, R., Rosa, L. M., & Diotto, A. V. (2019a). Design and hydrodynamic performance testing of a new pressure sand filter diffuser plate using numerical simulation. *Biosystems Engineering*, 183, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.015>.

Mesquita, M., De Deus, F. P., Testezlaf, R., & Diotto, A. V. (2019b). Removal efficiency by pressurized sand filters during the filtration process. *Desalination Water Treatment*, 161, 132e143. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24285>.

Nakayama, F. S., & Bucks, D. A. (1981). Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. *Transactions of the ASAE*, 24(1): 0077-0080. <https://doi: 10.13031/2013.34203>.

Pizarro Cabello, F. (1996). *Riegos localizados de Alta Frecuencia*. (3rd ed.). Madri: Mundi Prensa.

Pujol, T., Puig-Bargués, J., Arbat, G., Chaves., Duran-Ros, M., & Pujol, J., Cartagena, F. R. (2022). Nuremical study of the hydraulic Effects of modifying the outlet pipe and diffuser plate in pressurized sand filters with wand-type underdrains. *Journal of the ASABE*, 65(3), 609-619. <https://doi.org/10.13031/ja.14710>.

Salcedo, J., S., Testezlaf, R., & Mesquita, M. (2011). Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. *Engenharia Agrícola (Impresso)*, v. 31, p. 1226-1237 <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000600020>.

Testezlaf, R. (2008). Filtros de areia aplicados a irrigação localizada: Teoria e prática. *Engenharia Agrícola*, 28(3), 604-613. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000300020>.

Testezlaf, R., de Deus, F. P., & Mesquita, M. (2014). *Filtros de areia na irrigação localizada*. (1 ed). Campinas: Unicamp.

Segundo artigo:

Efeito do modelo construtivo da placa difusora na eficiência de remoção de sólidos suspensos totais no processo de filtração em filtro de areia pressurizado

Effect of the diffuser plate constructive model on the removal efficiency of total suspended solids in the filtration process in a pressurized sand filter

Artigo redigido nas normas da revista científica Biosystems Engineering, ISSN: 1537-5110
(versão preliminar)

Efeito do modelo construtivo da placa difusora na eficiência de remoção de sólidos suspensos totais no processo de filtração em filtro de areia pressurizado

Gabriel Dlouhy Alcon^a, Fábio Ponciano de Deus^a, Adriano Valentin Diotto^a, Michael Silveira Thebaldi^a, Marcio Mesquita^b, Yimga Nana^a, Nicolas Antônio Baptistella Zueleta^a

^a Universidade Federal de Lavras, Departamento de Recursos Hídricos, 3037, Lavras, Mg, Brasil

^b Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil

Resumo

O correto dimensionamento da placa difusora minimiza a ocorrência de vórtices no processo de filtração em filtros de areia pressurizados, melhorando a distribuição do fluido sobre a superfície da camada da areia. Isto pode levar a bons resultados na eficiência de remoção do equipamento, em virtude da redução da ocorrência de caminhos preferencias. Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do modelo construtivo de placa difusora, bem como da altura da camada filtrante e da taxa de filtração, na eficiência de remoção de sólidos suspensos totais no processo de filtração em filtro de areia comercial pressurizado. O experimento foi realizado em módulo hidráulico construído em circuito aberto de circulação da água, utilizando água proveniente de um ribeirão próximo ao experimento. Realizou-se a avaliação de dois modelos de placa difusora, combinados com duas alturas de camada filtrante (22.5 e 45 cm) e duas taxas de filtração (20 e 75 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$). De maneira geral, a distribuição dos sólidos retidos sobre a superfície da camada filtrante variou com a alteração da altura da camada filtrante e da taxa de filtração para as duas placas avaliadas, exceto nas maiores alturas e taxas de filtração, onde o comportamento para as duas placas foi semelhante. O incremento da altura da camada filtrante aumentou significativamente a eficiência de remoção de sólidos suspensos totais, contudo a placa difusora proposta apresentou melhor resultado no uso das menores taxas de filtração e alturas de camada filtrante. Os diferentes métodos de avaliação da eficiência de remoção utilizados apresentaram convergência de resultados. A adaptação da placa difusora proposta não teve efeito satisfatório, porém mostrou que o desenvolvimento de um novo projeto de placa difusora pode ser realizado com o intuito de obter melhores eficiências de remoção determinando menores gastos energéticos.

Palavras chave: irrigação localizada, tratamento físico da água, entupimento de emissores.

1 Introdução

Os orifícios de distribuição de água dos emissores utilizados na irrigação localizada possuem tamanho reduzido, com alta propensão a obstruções em decorrência da baixa qualidade das águas utilizadas. As obstruções causam diminuição da taxa de aplicação e uniformidade de distribuição, bem como aumento dos custos com manutenções e substituições de equipamentos (Frizzone et al., 2012; Nakyama & Buks, 1981).

O tratamento físico da água por meio de filtros é a medida preventiva mais recomendada na agricultura irrigada. Os filtros de areia são equipamentos utilizados por apresentarem remoção de maior faixa de diâmetro de partículas contidas na água em comparação aos filtros de tela e de disco, além de apresentarem melhor desempenho na remoção de sólidos orgânicos (Testezlaf et al., 2014).

A filtração e a retrolavagem são as duas operações realizadas em filtros de areia, sendo distintas, porém complementares. A filtração trata-se do processo de remoção de partículas sólidas em suspensão na água pela sua passagem forçada normalmente no sentido descendente por um meio filtrante (Testezlaf et al., 2008; Mesquita et al., 2012). A retrolavagem trata-se da limpeza da camada filtrante passando de forma forçada água tratada pela camada filtrante no sentido ascendente, promovendo sua expansão, e permitindo que os sólidos retidos durante a filtração sejam removidos (Salcedo et al., 2011; de Deus et al., 2016; Mesquita et al., 2017; de Deus et al., 2020).

Os filtros de areia são compostos internamente por placa difusora e sistema de drenagem. A placa difusora trata-se de uma estrutura instalada na parte superior do equipamento, com o objetivo de reduzir a energia cinética do fluido no processo de filtração, e distribuí-lo de forma uniforme sobre a superfície da camada filtrante (de Deus et al., 2013; Mesquita et al., 2019b). A alteração do modelo construtivo de placa difusora resulta em diferentes comportamentos hidráulicos, variações nas características das linhas de fluxo, diferenciação na intensidade do revolvimento da superfície da camada de areia, podendo promover a criação de caminhos preferencias para a água e para os sólidos em suspensão, afetando a eficiência de remoção do equipamento, o tempo de filtração e a frequência das retrolavagens (Pujol et al., 2022, Tezteslaf et al., 2014). Utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD), alguns autores mostraram que o correto dimensionamento da placa difusora minimiza a criação de vórtices, promovendo a distribuição mais uniforme do fluido, reduzindo a criação de caminhos preferenciais e melhorando

a eficiência de remoção do equipamento no processo de filtração (Abart et al., 2011; Mesquita et al., 2019a; Pujol et al., 2022).

De acordo com Pizarro Cabello (1996), a remoção de sólidos em suspensão na água em leitos filtrantes ocorre em três processos diferentes. Primeiramente pela remoção superficial, processo denominado por “Peneiramento e Coamento”. Posteriormente as partículas não removidas pela superfície poderão ser removidas por “Sedimentação”, onde em decorrência da redução da velocidade intersticial do fluido e pela ação da gravidade, ocorrerá a remoção. O terceiro processo de remoção é denominado por “Adesão e/ou Coesão”, onde a remoção das partículas ocorrem pela ação eletrostática. Estes três processos ocorrem de forma dinâmica, variando em função das características estruturais do filtro, do meio filtrante (granulometria e altura da camada), e da taxa de filtração, podendo alterar a eficiência de remoção do processo de filtração (Testezlaf et al., 2014). Mesquita et al. (2019b) observaram maiores eficiências de remoção no uso das menores granulometrias de areia associadas às maiores taxas de filtração. Adicionalmente os autores observaram que a superfície da camada filtrante foi a maior responsável pela remoção de sólidos, sendo levantada a hipótese da não necessidade de utilização de alturas de camada filtrante elevadas, podendo-se como consequência construir filtros menores e proporcionar economia na produção dos equipamentos.

Em trabalho realizado por Mesquita et al. (2019a) foi desenvolvido um modelo de placa difusora que produziu distribuição mais uniforme da água, porém não foi avaliada a consequência na remoção de partículas. Nesse sentido, espera-se que o uso de placa difusora que produza maior uniformidade de distribuição do fluido determine maior eficiência de remoção. Levando em consideração que o maior percentual de sólidos fica retido na camada superficial da camada filtrante, como relatado no trabalho de Mesquita et al. (2019b), espera-se que a alteração da altura da camada filtrante não influencie na eficiência de remoção do equipamento. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do modelo construtivo de placa difusora, bem como da altura da camada filtrante e da taxa de filtração, na eficiência de remoção de sólidos suspensos totais no processo de filtração de um filtro de areia comercial pressurizado.

2 Material e métodos

2.1 Módulo experimental

A pesquisa foi desenvolvida em um módulo hidráulico (Figura 1) composto pelos seguintes equipamentos: - filtro de areia comercial da marca Hidrosolo (modelo FA07), o qual na Tabela 1 apresentam-se suas características técnicas; - um sensor de vazão do tipo rotor (GF Signet, modelo 3-2536-P0) com $\pm 1\%$ de linearidade e $\pm 0.5\%$ de repetibilidade; - dois registros de gaveta instalados antes e após o filtro para controle de fluxo; - dois registros de esfera instalados antes e após do filtro para coleta de água; - um transdutor de pressão diferencial modelo MPX5700DP (Freescale Semi-conductor Brasil, Campinas, São Paulo, Brasil) conectado às duas tomadas de pressão integral instaladas antes e após o filtro, possibilitando a aferição da perda de pressão ocorrida no filtro; - um reservatório de água; - uma motobomba da marca Schneider (modelo BC – 22R 1¼” 7.5 cv Trifásico 60 Hz 220/380 V); - uma placa de aquisição de dados Campbell Scientific (modelo CR10), para a coleta e armazenamento dos dados de vazão e de perda de pressão; - um computador para visualização em tempo real dos dados coletados. O sensor de vazão e as tomadas de pressão do tipo integral foram instalados a uma distância equivalente à cinco vezes o diâmetro da tubulação das curvas e registros, de acordo com as recomendações da norma ASABE (2008).

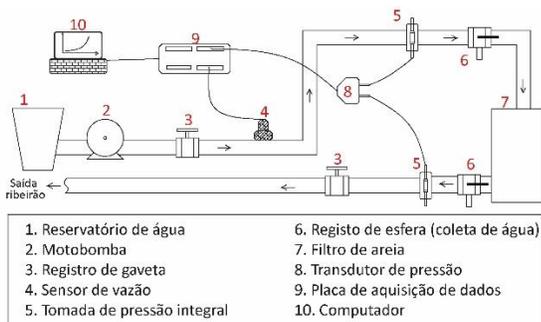


Figura 1 - Módulo hidráulico com detalhe do sentido do fluxo e dos equipamentos utilizados nos ensaios experimentais.

Tabela 1 – Especificações técnicas do filtro de areia avaliado (filtro de areia Hidrosolo / modelo FA07).

| Especificação | Valor |
|---|-------|
| Diâmetro do corpo do filtro (mm) | 400 |
| Área transversal de filtração (m ²) | 0.125 |
| Diâmetro interno da tubulação de entrada (mm) | 50.8 |
| Diâmetro interno da tubulação de saída (mm) | 50.8 |
| Altura útil do filtro ^a (mm) | 600 |

^a Distância entre a base da placa difusora e o nível superior dos drenos.

O reservatório de água era abastecido por gravidade com água proveniente de um ribeirão adjacente ao laboratório(Ribeirão Vermelho) pertencente a Sub-Bacia do Baixo do Alto do Rio Grande, cuja água retornava ao ribeirão após a sua circulação pelo módulo hidráulico.

2.2 Meio filtrante e altura da camada

O meio filtrante utilizado foi a areia sílica. O material possuía 1.613 g cm^{-3} de massa específica, $0.41 \pm 0.01 \text{ mm}$ de diâmetro médio efetivo (D_{10}), e 1.65 ± 0.03 de coeficiente de uniformidade (CU). Esta granulometria foi selecionada por ter apresentando os melhores resultados de remoção no trabalho de Mesquita et al. (2019b).

Foram avaliadas duas alturas de camada filtrante ($H_1=22.5 \text{ cm}$, e $H_2=45 \text{ cm}$ – limite recomendado pelo fabricante), com intuito de se verificar a sua influência na remoção de contaminantes, além de avaliar a influência da sua proximidade da superfície da camada filtrante com a placa difusora, na eficiência de remoção e na distribuição dos sólidos suspensos na superfície da camada filtrante.

2.3 Placas difusoras

Avaliou-se dois modelos construtivos de placa difusora (Figura 2) (PP: placa difusora proposta, PO: placa difusora original). A placa PP foi instalada a 150 mm de distância da tubulação de entrada do equipamento (recomendação de Mesquita et al. (2019a)), e a placa foi instalada a 60 mm (recomendação do fabricante do filtro).

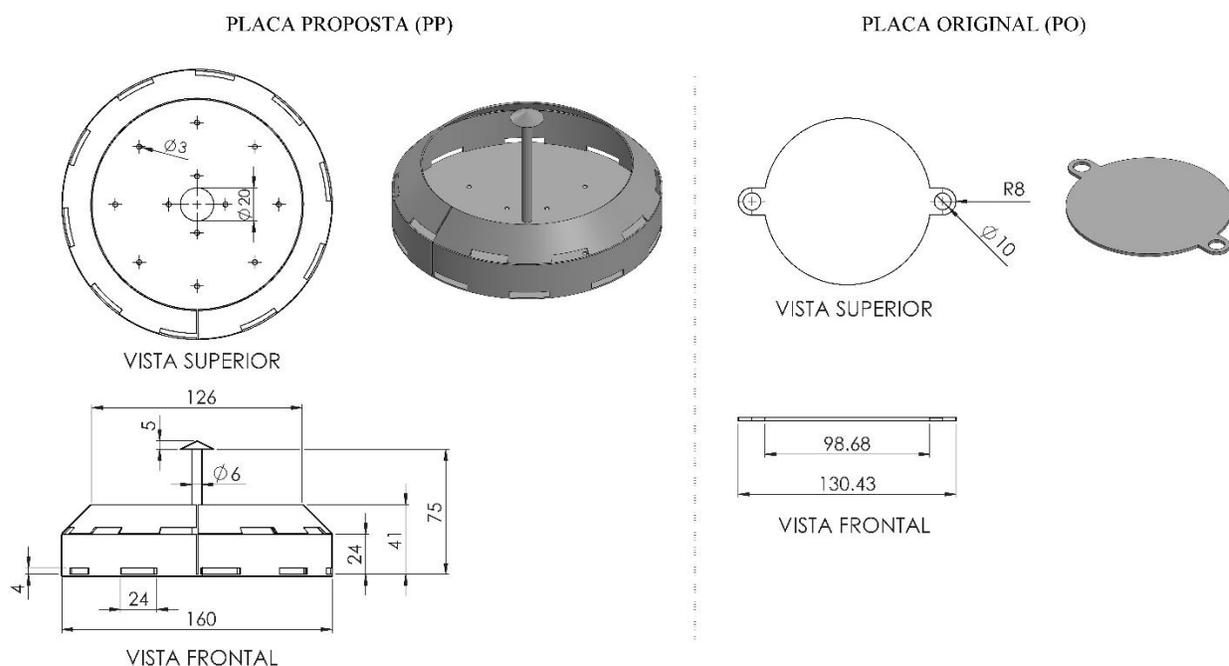


Figura 2 – Detalhes construtivos das placas difusoras avaliadas (PP – placa difusora proposta, e PO – placa difusora original), com dimensões em milímetros.

A placa proposta (PP) possui a mesma forma geometria da placa desenvolvida por Mesquita et al. (2019a), porém com dimensões proporcionais ao diâmetro do equipamento.

2.4 Caracterização física e química da água utilizada

A água utilizada apresentou média de sólidos suspensos totais de $4.00 \pm 1.52 \text{ mg L}^{-1}$, que segundo classificação de Nakayama & Bucks (1991) apresenta baixo potencial de entupimento dos emissores, possibilitando seu uso na irrigação localizada. Na Tabela 2 é apresentado o resultado da análise física e química da água utilizada no experimento.

Tabela 2 – Resultados da análise física e química da água utilizada no experimento.

| Parâmetros | Resultado | Parâmetros | Resultado |
|--|------------------------|--|-----------|
| pH | 6,1 | Cloretos (mg L^{-1}) | 18 |
| Acidez Total (mg L^{-1}) | 30 | Dureza Total (mg L^{-1}) | 40 |
| Condutividade Elétrica ($\mu\text{s cm}^{-1}$) | 650 | DBO | 3 |
| Ferro Total (mg L^{-1}) | 1,2 | Alcalinidade Bicarbonatos (mg L^{-1}) | 44 |
| Manganês Total (mg L^{-1}) | 0 | Alcalinidade Carbonatos (mg L^{-1}) | 0 |
| Nitrato (mg L^{-1}) | 0,09 | Oxigênio Dissolvidos (mg L^{-1}) | 7,5 |
| Nitrito (mg L^{-1}) | $< 9,5 \times 10^{-5}$ | | |

De acordo com Nakayama & Bucks (1991), os valores de pH e Manganês Total não apresentam risco à irrigação localizada, já a concentração de Ferro Total de $1,2 \text{ mg L}^{-1}$ apresenta risco moderado de obstrução dos emissores, e a salinidade é considerada média, onde seu uso é recomendado para solos com lixiviação moderada e em culturas com tolerância moderada aos sais.

2.5 Procedimento experimental

Foram avaliadas as taxas de filtração de 20 e $75 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (TF20 e TF75 respectivamente). O objetivo foi avaliar a influência da taxa de filtração na remoção de partículas tal como relatado no trabalho de Mesquita et al. (2019b). As taxas de filtração foram avaliadas de forma combinada com as duas alturas de camada filtrante ($H_1=22.5 \text{ cm}$ e $H_2=45 \text{ cm}$), os dois modelos de placa difusora (PP e PO), realizando-se três repetições (2 taxas x 2 alturas x 2 placas x 3 repetições = 24 ensaios experimentais). Cada teste foi realizado por 4 horas.

No decorrer do tempo de avaliação, realizou-se a cada 10 minutos coletas de 200 ml de água antes e após o filtro, totalizando 24 coletas antes e 24 coletas após o filtro. As coletas realizadas no decorrer do tempo foi uma modificação da norma ASABE (2008) que preconiza a coleta de apenas uma amostra, que tinha objetivo melhorar a representatividade da avaliação. Com as coletas produziu-se uma amostra composta antes e uma após o filtro. Após o término do ensaio, realizou-se a coleta dos dados da superfície do leito filtrante para avaliação da deformação da camada superficial, e em seguida coletou-se amostras de areia na superfície e em profundidade da camada filtrante com o intuito de avaliar a remoção de sólidos utilizando dados da areia. Cada ensaio experimental foi composto por camada filtrante com areia limpa.

2.6 Eficiência de remoção do filtro de areia

Foram utilizadas duas metodologias para a avaliação da eficiência de remoção do processo de filtração do filtro de areia. A primeira é conhecida como "Metodologia Padrão", preconizada pela norma ASABE (2008), que recomenda a estimativa dos sólidos suspensos totais contidos na água antes e após o filtro de areia. A segunda metodologia refere-se ao "método da inversão da proveta" (avaliação dos sólidos retidos na areia), desenvolvido por Standen e Haarhoff (2004), e adaptado por Mesquita et al. (2019b) na avaliação da eficiência de remoção do processo de filtração em filtro de areia.

Para ambas metodologias os sólidos suspensos totais foram determinados utilizando-se a recomendações da norma APHA-AWWA (1995).

2.6.1 Metodologia padrão

A metodologia da norma ASABE (2008) preconiza a contabilização dos sólidos suspensos totais de uma amostra antes e após o filtro de areia no processo de filtração, possibilitando estimar a eficiência de remoção pela Equação 1.

$$ER_{agua} = \left(\frac{\overline{SST}_{ent} - \overline{SST}_{saida}}{\overline{SST}_{ent}} \right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{\overline{SST}_{saida}}{\overline{SST}_{ent}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Onde: ER_{agua} – eficiência de remoção do processo de filtração com base nas informações da água (%); \overline{SST}_{ent} – média dos sólidos suspensos totais que entraram no filtro de areia no processo de filtração (mg L^{-1}); e \overline{SST}_{saida} – média dos sólidos suspensos totais que saíram do filtro de areia no processo de filtração (mg L^{-1}).

2.6.2 Sólidos retidos na areia – Método da inversão da proveta

Com o intuito de avaliar a influência das variáveis da pesquisa na distribuição dos sólidos retidos na superfície da camada filtrante, definiu-se os pontos de coleta de amostras de areia em quatro anéis circulares, denominados por R_1 (2.90 cm), R_2 (8.60 cm), R_3 (14.30 cm) e R_4 (20 cm) (Figura 3). Nos anéis circulares R_2 , R_3 e R_4 realizou-se duas amostragens, compondo uma amostra composta por ponto (R_2 : C_{2a} e C_{2b} / R_3 : C_{3a} e C_{3b} / R_4 : C_{4a} e C_{4b}), e apenas no círculo R_1 foi realizada uma amostragem (C_1). A profundidade de coleta das amostras da superfície (hs) foi equivalente a 3.75 cm.

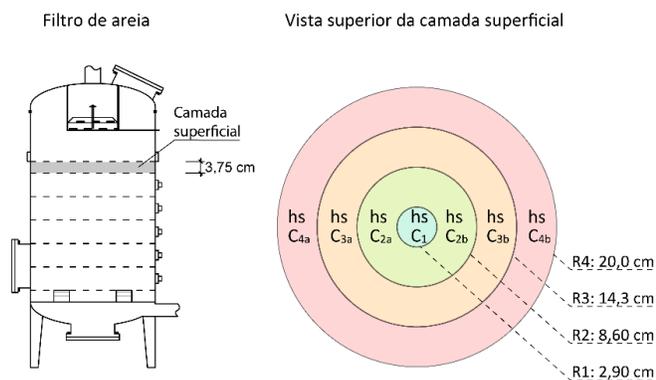


Figura 3 – Detalhe da superfície da camada filtrante, bem como da vista superior da superfície da camada com a localização dos pontos de amostragem.

A localização dos pontos de amostragem de areia realizados em profundidade na camada, tiveram o mesmo raciocínio da amostragem da superfície. Realizou-se as coletas de amostras na superfície por meio de um anel volumétrico com diâmetro de 51,29 mm e altura de 29,25 mm, já em profundidade utilizou-se um amostrador inserido em aberturas laterais do filtro. Na Figura é demonstrado a localização dos pontos de amostragem em profundidade na camada filtrante (camadas estratificadas de 7.5 cm), para as alturas H1 e H2. As alturas de amostragem em profundidade são respectivamente $h_{p1}=15$ cm para H1, e $h_{p2}=37.5$ cm para H2. As amostragens realizadas em pontos com mesma coloração tiveram a composição de uma amostragem composta.

A separação das amostragens de areia da superfície da camada, e as realizadas em profundidade tem o objetivo de quantificar a variabilidade espacial dos sólidos na superfície em função das variáveis avaliadas, bem como quantificar a importância do efeito do peneiramento e coamento na retenção de sólidos durante o processo de filtração.

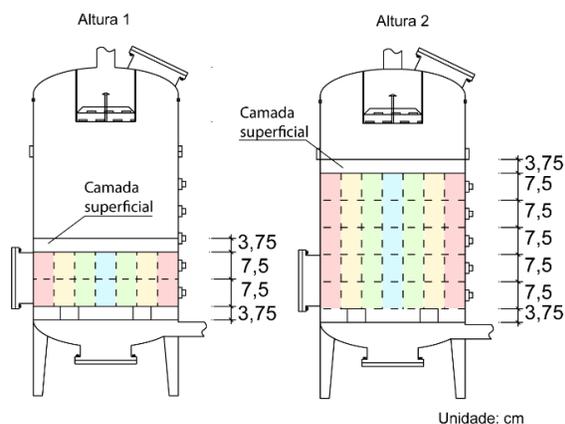


Figura 4 – Detalhe da localização dos pontos de amostragem em profundidade na camada filtrante para as alturas H1 e H2.

Para quantificar a massa de sólidos suspensos retidos na camada de areia utilizou-se o “Método da Inversão da Proveta” proposto por Standen e Haarhoff (2004), e adaptado por Mesquita et al. (2019b) na avaliação da eficiência de remoção do processo de filtração em filtro de areia. As etapas de quantificação dos sólidos retidos na areia foram as seguintes:

- 1) Retirar 50 g de areia de cada amostra composta;
- 2) Alocar a areia em uma proveta de 250 mL;
- 3) Adicionar 100 mL de água destilada;
- 4) Inverter a proveta 20 vezes, realizando-se pausas entre as inversões para o assentamento da areia no fundo da proveta;
- 5) Drenar o líquido resultante em um beaker de 500 ml;
- 6) Repetir por mais 4 vezes os passos 3, 4 e 5, totalizando 500 mL de água com sólidos em suspensão;
- 7) Dos 500 mL produzidos, retirar uma amostra para realização da análise de sólidos suspensos totais (SST).

Após a análise SST calculou-se a massa de sólidos retidos na amostra de 50 g de areia utilizando as equações 2 e 3, respectivamente para a superfície da camada filtrante, e em profundidade na camada. Para isso a diferença numérica entre sólidos suspensos totais após e antes do processo de filtração foi multiplicado pelo volume equivalente a 0.5 L.

$$ms_i = (SSTs_i - SST_{areia}). 0,5. 10^{-3} \quad (2)$$

$$mp_i = (SSTp_i - SST_{areia}). 0,5. 10^{-3} \quad (3)$$

Onde: ms_i e mp_i – massa de sólidos retidos em amostra retirada da superfície e em profundidade na camada filtrante respectivamente, referente ao raio i do anel analisado (g); $SSTs_i$ e $SSTp_i$ – sólidos suspensos totais retidos nas amostras da superfície e em profundidade respectivamente, referente ao raio i do anel analisado (mg L^{-1}); e SST_{areia} – sólidos suspensos totais retidos nas amostras de areia antes do processo de filtração (mg L^{-1}).

A massa de areia contida em cada volume de anel circular foi estimada utilizando a equação 4.

$$ms_{a,i} = \pi. (R_i^2 - R_{i-1}^2). h. \rho \quad (4)$$

Onde: $ms_{a,i}$ - massa de areia contida no volume do anel circular (g); R_i - raio anel circular avaliado (cm); R_{i-1} - raio do anel circular anterior, com $R_0 = 0$ (cm); ρ - massa específica da areia ($g\ cm^{-3}$); e h - altura da camada filtrante avaliado, podendo ser hs ou hp (hp_1 e hp_2) (cm).

A massa de sólidos retida na camada superficial (MSS_i) e em profundidade (MSP_i) no volume do anel circular “i” foram estimadas pelas equações 5 e 6 respectivamente.

$$MSS_i = \frac{ms_{a,i}}{50} . ms_i \quad (5)$$

$$MSP_i = \frac{ms_{a,i}}{50} . mp_i \quad (6)$$

Substituindo as equações 2 e 4, na equação 5, bem como as equações 3 e 4 na equação 6, tem-se respectivamente as equações MSS_i e MSP_i desenvolvidas.

$$MSS_i = (R_i^2 - R_{i-1}^2) . (SSTs_i - SST_{areia}) . hs . \pi . \rho . 10^{-5} \quad (7)$$

$$MSP_i = (R_i^2 - R_{i-1}^2) . (SSTp_i - SST_a) . hp . \pi . \rho . 10^{-5} \quad (8)$$

Realizando-se o somatório das massas de sólidos retidos nos diferentes anéis volumétricos, pelas equações 9 e 10 respectivamente estimou-se a massa total de sólidos retidos na superfície (TRs) e em profundidade (TRp) na camada filtrante.

$$TRs = \sum_{i=1}^4 MSS_i \quad (9)$$

$$TRp = \sum_{i=1}^4 MSP_i \quad (10)$$

Onde: TRs - massa total de sólidos retidos na superfície da camada filtrante (g); e TRp - massa total de sólidos retidos em profundidade na camada filtrante (g).

Através da soma de TRs e TRp obteve-se a massa total de sólidos retidos no filtro de areia (TR) (equação 11).

$$TR = TRs + TRp \quad (11)$$

Onde: TR – massa total de sólidos retidos no filtro de areia (g).

A equação 12 foi utilizada para estimar a massa total de sólidos que entraram no filtro de areia durante o processo de filtração

$$TS_{ent} = SST_{ent} \cdot TF \cdot A \cdot t \quad (12)$$

Onde: TS_{ent} – estimativa da massa total de sólidos que entraram no filtro de areia durante o processo de filtração (g); SST_{ent} – média dos sólidos suspensos totais na água coletado antes de entrar no filtro de areia (mg L^{-1}), TF - taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); A – área transversal do filtro de areia (m^2); e t - tempo de filtração (h).

A eficiência de remoção do processo de filtração do filtro de areia com base nos sólidos que ficaram retidos na camada filtrante (ER_{areia}) foi estimado utilizando a equação 13.

$$ER_{areia} = \frac{TR}{TS_{ent}} \cdot 100 \quad (13)$$

Onde: ER_{areia} - eficiência de remoção no processo de filtração do filtro de areia com base nos sólidos retidos na camada filtrante (%).

2.7 Gradiente de perda de pressão

Para avaliar de forma indireta a capacidade de remoção do filtro de areia para as diferentes combinações experimentais, realizou-se a estimativa da variação de perda de pressão do equipamento no intervalo de avaliação, ponderado pela massa total de sólidos que entraram no filtro de areia (equação 14).

$$\Delta P_{me} = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{TS_{ent}} \quad (14)$$

Onde: ΔP_{me} – variação da perda de pressão do equipamento entre o início e o final do processo de filtração (kPa g^{-1}); $P_{inicial}$ – perda de pressão no início do processo de filtração (kPa); P_{final} - perda de pressão no final do processo de filtração (kPa).

2.8 Deformação da superfície da camada filtrante

Após os ensaios de filtração avaliou-se a deformação da superfície da camada filtrante em todas as combinações e repetições experimentais.

Registrou-se a deformação da camada filtrante pela aferição da distância da superfície em relação a um plano de referência fixo (base da placa difusora), em toda extensão da superfície. Para isso, foi desenvolvido um dispositivo composto por sensores de distância a laser (marca OEM, modelo V15310X), cuja movimentação ocorria com o auxílio de um motor de passo (marca ROHS, modelo 28BYJ-48), possibilitando a movimentação radial (da extremidade até o centro) e angular

(gradientes de $5^{\circ}37'30''$ até completar 360°). A Figura 5 ilustra o dispositivo, com detalhe das suas dimensões e da instalação do dispositivo.

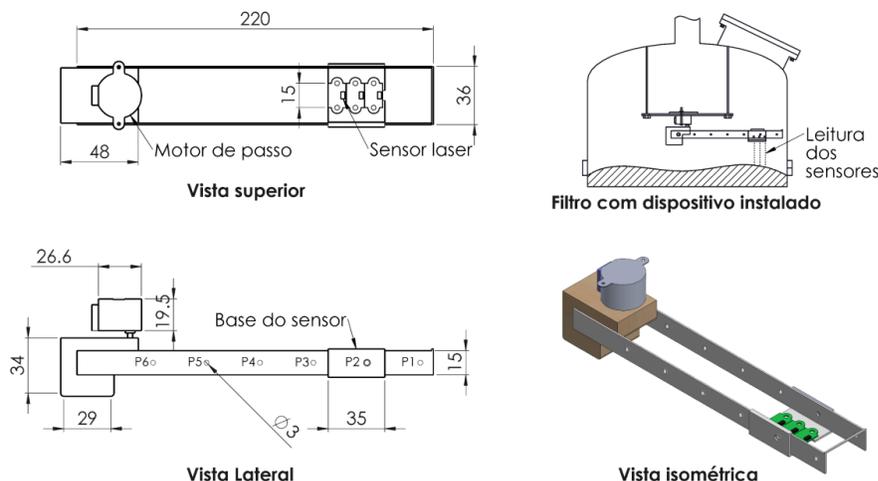


Figura 5 - Detalhe da localização do dispositivo utilizado na avaliação da deformação da superfície da camada filtrante, e suas dimensões (unidade: mm).

As posições radiais onde ocorriam as leituras foram pré-definidas, sendo representado na Figura 5 pelos pontos p1, p2, p3, p4 e p5, distanciados em 3.3 cm. A avaliação da deformação gerou 1152 pontos de medição para cada combinação experimental. Os dados gerados foram tratados para se obter as cotas de cada ponto, tendo como referência o nível superior dos drenos. Posteriormente utilizou-se o programa Surfer versão 18 (Golden Software LCC) para gerar superfícies tridimensionais da superfície da camada filtrante.

2.9 Análise dos dados

Os fatores que influenciaram significativamente ($P \leq 0.05$) os resultados do trabalho foram avaliados utilizando teste Tukey. O software Sigmaplot versão 11.0 foi utilizado para auxiliar nas análises.

3 Resultados e discussão

3.1 Perda de pressão do processo de filtração

A Figura 6 mostra o comportamento da perda de pressão do filtro de areia no decorrer do tempo de filtração, respectivamente para as placas difusoras original e proposta.

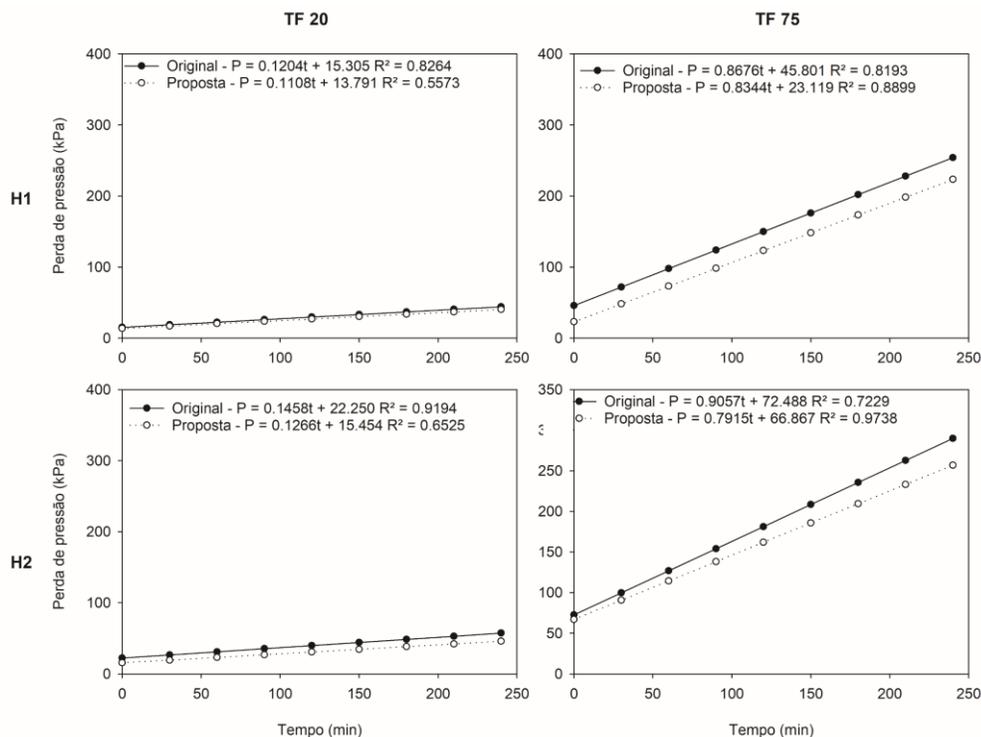


Figura 6 - Comportamento da perda de pressão no decorrer do tempo de filtração para as diferentes combinações de taxa de filtração, altura da camada filtrante, e modelos de placa difusora.

Para todos os tratamentos observou-se aumento linear da perda de pressão com tempo de filtração, fato também observado por Mesquita et al. (2019b). O incremento da altura da camada filtrante, fixando-se as taxas de filtração e modelos de placa difusora, não determinaram diferenciação visível na perda de pressão no decorrer do tempo. Entretanto esperava-se valores iniciais de perda de pressão diferentes entre os trabalhos, fato não observado talvez em decorrência da presença de sólidos na superfície do leito filtrante igualando o comportamento inicial. Fixando-se a placa difusora e a altura da camada filtrante, observou-se maior taxa de variação temporal da perda de no uso da taxa de filtração TF75 em comparação à taxa TF20, fato também observado por de Deus et al. (2015).

Ao longo do processo de filtração há acúmulo contínuo de sólidos na camada filtrante, aumentando a resistência ao escoamento no decorrer do tempo. Considerando o mesmo tempo de filtração, a taxa TF75 proporcionou a entrada de maior quantidade de sólidos em comparação à TF20, apresentando maior taxa de incremento da perda de pressão com o tempo. Com o intuito de compreender a influência da taxa de filtração na capacidade de remoção do equipamento, avaliou-se a variação de perda de pressão entre o início e o fim do processo de filtração, ponderado pela

massa total de sólidos que entraram no filtro de areia. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é ilustrado o comportamento da variação de perda de pressão entre o início e o fim do processo de filtração, ponderado pela massa total de sólidos que entraram no filtro de areia, para as diferentes combinações experimentais.

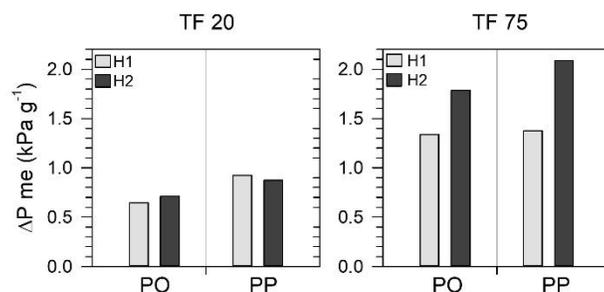


Figura 7 – Comportamento da variação da perda de pressão entre o início e o fim do processo de filtração, ponderado pela massa total de sólidos que entraram no filtro de areia.

Nas Tabelas 3 e 4 estão apresentados os resultados do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de ΔP_{me} , avaliando respectivamente a influência combinada da altura da camada filtrante e a taxa de filtração, bem como a influência do modelo de placa difusora;

Tabela 3 – Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para as médias de ΔP_{me} , considerando a influência da altura da camada filtrante e a taxa de filtração¹.

| Placa difusora | Altura da camada filtrante | Taxa de filtração | |
|----------------|----------------------------|-------------------|----------------|
| | | TF20 | TF75 |
| Original | H1 | 0.64 ± 0.27 bA | 1.33 ± 0.11 aA |
| | H2 | 0.71 ± 0.01 bA | 1.79 ± 0.36 aA |
| Proposta | H1 | 0.92 ± 0.32 aA | 1.38 ± 0.16 aA |
| | H2 | 0.87 ± 0.45 bA | 2.09 ± 0.92 aA |

¹letras minúsculas diferentes na horizontal, e letras maiúsculas diferentes na vertical, diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança da altura da camada filtrante e da taxa de filtração respectivamente.

Tabela 4 - Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para as médias de ΔP_{me} , considerando a influência do modelo de placa difusora¹.

| Taxa de filtração | Placa difusora | Altura da camada filtrante | |
|-------------------|----------------|----------------------------|----------------|
| | | H1 | H2 |
| TF20 | Original | 0.64 ± 0.27 aA | 0.71 ± 0.01 bA |
| | Proposta | 0.92 ± 0.32 aA | 0.87 ± 0.45 bA |
| TF75 | Original | 1.33 ± 0.11 aA | 1.79 ± 0.36 aA |
| | Proposta | 1.38 ± 0.16 aA | 2.09 ± 0.92 aA |

¹letras minúsculas diferentes na vertical diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança do modelo de placa difusora.

Os maiores valores ocorreram na taxa de filtração TF75, em POH2 e PPH2, além de serem onde ocorreram as únicas diferenças estatísticas com aumento da taxa de filtração. A perda de pressão no filtro de areia no processo de filtração tem sua taxa de incremento maior em TF75, possuindo comportamento semelhante para as duas alturas avaliadas (H1 e H2). Sendo assim, a velocidade com que os sólidos suspensos adentram no filtro de areia tem influência em maiores alturas de camada filtrante.

3.2 Retenção de sólidos retidos na camada filtrante

Pela Figura 8 é possível observar o comportamento da massa média de sólidos retidos na camada de areia para as diferentes combinações experimentais.

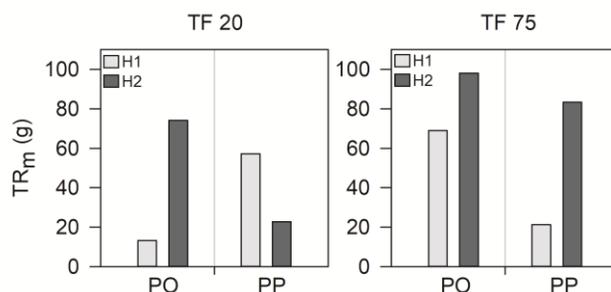


Figura 8 – Média da massa de sólidos retidos na camada de filtrante após o processo de filtração em um modelo comercial de filtro de areia, para as diferentes combinações experimentais avaliadas.

Na Tabela 5 é apresentado o resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados médios de TR_m na avaliação da influência do modelo de placa difusora e da altura da camada filtrante. Como a quantidade de sólidos que entram no filtro foi diferente entre as taxas de filtração TF20 e TF75, não se realizou a avaliação da influência dessa variável nesses dados.

Tabela 5 – Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de tTR_m , para os diferentes modelos de placa difusora e alturas de camada filtrante¹ (g).

| Taxa de filtração | Modelo de placa difusora | Altura da camada filtrante | |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|
| | | H1 | H2 |
| TF20 | Original | 13.27 ± 4.72 bB | 74.18 ± 7.67 aA |
| | Proposta | 57.16 ± 9.86 aA | 22.78 ± 9.41 bB |
| TF75 | Original | 68.98 ± 24.43 aA | 98.18 ± 25 aA |
| | Proposta | 21.21 ± 8.56 bB | 83.4 ± 22.01 aA |

letras minúsculas diferentes na vertical, e letras maiúsculas diferentes na horizontal, diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança do modelo de placa difusora e da altura da camada filtrante respectivamente.

Observou-se que no uso da placa difusora original o aumento da altura da camada filtrante determinou incremento significativo retenção de sólidos para TF20, e para TF75 não se observou diferenciação significativa. Já no uso da placa difusora proposta o aumento da altura da camada filtrante determinou aumento da retenção de sólidos apenas para TF75, e para TF20 observou-se comportamento contrário, com redução da retenção de sólidos no aumento da altura da camada filtrante.

Com relação à influência do modelo de placa difusora na retenção de sólidos, observou-se que a placa proposta determinou maior retenção apenas no uso da menor altura de camada filtrante e menor taxa de filtração (H1TF20). Nas demais combinações a placa original apresentou melhor resultado, com exceção da combinação H2TF75 que apresentou igualdade estatística.

Apesar da placa proposta ter apresentado melhor resultado em termos de comportamento hidráulico, em termos de retenção de sólidos não apresentou os melhores resultados. O melhor resultado ocorreu no uso da taxa de filtração TF75 na maior altura da camada filtrante (H2), com filtro de areia equipado com a placa difusora original. Apesar disso, é possível observar influência significativa na retenção de sólidos das diferentes combinações entre modelos de placa, alturas de camada filtrante e taxas de filtração, devendo-se os fabricantes se atentarem no desenvolvimento do equipamento para atingir maiores remoções de sólidos.

Na Figura 9 é apresentado o comportamento da massa de sólidos retidos na superfície e em profundidade na camada filtrante, para as diferentes combinações experimentais. Para possibilitar a comparação entre a retenção de sólidos na superfície e em profundidade, realizou-se a ponderação pela altura de amostragem da superfície e da profundidade.

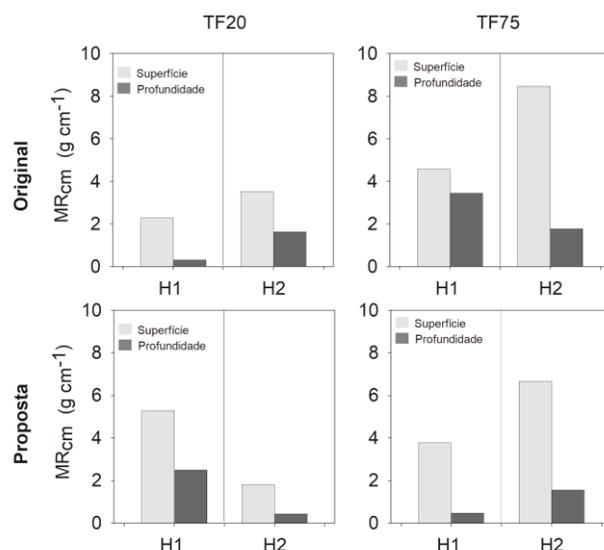


Figura 9 – Comportamento da relação entre massa de sólidos retidos pela altura de amostragem da superfície, e pela altura de amostragem da profundidade da camada filtrante (g cm^{-1}).

Em todas as combinações experimentais a superfície da camada filtrante apresentou as maiores remoções de sólidos ponderado pela altura de amostragem, evidenciando a importância do “peneiramento” de acordo com a classificação de Pizarro Cabelo (1996). Resultado análogo também foi observado por Mesquita et al. (2019b). Na Tabela 6 é apresentado o resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de massa de sólidos retidos por altura de camada filtrante (mr) em função da localização na camada filtrante.

Tabela 6 - Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de massa de sólidos retidos por altura de camada filtrante (mr) em função da localização na camada filtrante¹.

| Taxa de filtração | Placa difusora | Localização na camada filtrante | H1 | H2 |
|-------------------|----------------|---------------------------------|---------------|---------------|
| TF20 | Original | Superfície | 2.29 ± 1.27 a | 3.52 ± 0.78 a |
| | | Profundidade | 0.31 ± 0.26 a | 1.63 ± 0.13 a |
| | Proposta | Superfície | 5.28 ± 1.16 a | 1.81 ± 2.54 a |
| | | Profundidade | 2.49 ± 0.95 b | 0.43 ± 0.05 a |
| TF75 | Original | Superfície | 4.59 ± 1.58 a | 8.47 ± 1.65 a |
| | | Profundidade | 3.45 ± 1.29 a | 1.77 ± 0.81 b |
| | Proposta | Superfície | 3.76 ± 1.62 a | 6.66 ± 1.83 a |
| | | Profundidade | 0.47 ± 0.26 b | 1.56 ± 0.41 b |

¹letras minúsculas diferentes na vertical diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança da localização na camada filtrante.

No uso da taxa TF20 o único tratamento que apresentou diferença estatística foi PP H1. Já no uso da taxa TF75 todos os tratamentos apresentaram significância (exceção do PO H1). Em

todos os casos que apresentaram significância a retenção foi maior na superfície em comparação à retenção em profundidade. Mesquita et al. (2019a) afirmam que as placas que distribuem melhor o fluxo (placa proposta) reduzem a ocorrência de caminhos preferenciais, promovendo o uso mais efetivo da superfície do leito filtrante, ao se comparar com a placa "original". Adicionalmente Mesquita et al. (2019a) mencionam que camadas filtrantes mais próximas da entrada da água (maiores alturas de camada filtrante), receberam maior velocidade do fluido, potencializando a ocorrência da fase do peneiramento.

Na Tabela 7 é apresentado o resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de massa de sólidos retidos por altura de camada filtrante (mr) para as diferentes combinações entre modelos de placa difusora e alturas de camada filtrante.

Tabela 7 - Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de massa de sólidos retidos por altura de camada filtrante (mr) avaliando a influência do modelo de placa difusora e da altura da camada filtrante¹.

| Taxa de filtração | Localização na camada filtrante | Placa difusora | H1 | H2 |
|-------------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| TF20 | Superfície | Original | 2.29 ± 1.27 bA | 3.52 ± 0.78 aA |
| | | Proposta | 5.28 ± 1.16 aA | 1.81 ± 2.54 aB |
| | Profundidade | Original | 0.31 ± 0.26 aA | 1.63 ± 0.13 aA |
| | | Proposta | 2.49 ± 0.95 aA | 0.43 ± 0.05 aA |
| TF75 | Superfície | Original | 4.59 ± 1.58 aB | 8.47 ± 1.65 aA |
| | | Proposta | 3.76 ± 1.62 aB | 6.66 ± 1.83 aA |
| | Profundidade | Original | 3.45 ± 1.29 aA | 1.77 ± 0.81 aA |
| | | Proposta | 0.47 ± 0.26 bA | 1.56 ± 0.41 aA |

¹letras minúsculas diferentes na vertical, e letras maiúsculas diferentes na horizontal, diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança do tipo de placa difusora e da altura da camada filtrante respectivamente.

Com exceção do tratamento TF20H1 com sólidos retidos na superfície (Modelo proposto > Modelo original), e do tratamento TF75H1 em profundidade (Modelo original > Modelo proposto), não foi constatado diferenciação estatística entre os modelos de placa difusora.

Analisando a influência da altura da camada filtrante, observou-se que no uso da taxa TF20 associado à placa proposta ocorreu redução dos sólidos retidos na superfície com o aumento da altura da camada filtrante. Os demais tratamentos no uso da menor taxa de filtração (TF20) apresentaram-se iguais estatisticamente com o aumento da camada filtrante. Já no uso da maior taxa de filtração (TF75), observou-se que o aumento da altura da camada filtrante aumentou a massa de sólidos retidos na superfície para ambos os modelos de placa difusora. De maneira geral,

considerando os sólidos retidos em profundidade, não foi observado diferenciação significativa com a mudança da altura da camada filtrante, onde as mudanças ocorreram apenas na superfície. Em trabalho desenvolvido por Mesquita et al. (2019a), foi relatado que a redução da distância da superfície da camada filtrante à placa difusora pode determinar redução do potencial da superfície em remover sólidos, consequência da redução da uniformidade de distribuição do fluido sobre a superfície, fato observado pelo presente trabalho.

O comportamento das linhas de fluxo resultante do modelo construtivo da placa difusora podem determinar maiores acúmulos de sólidos em regiões específicas. De acordo com Mesquita et al. (2019a), a placa difusora "original" tem seu fluxo direcionado para regiões mais próximas da parede do filtro, podendo desta forma direcionar os sólidos para essa região, havendo como consequência maiores acúmulos de sólidos e aumento do efeito do peneiramento, dificultando a passagem de sólidos para as camadas em profundidade.

Na Figura 10 é apresentado a relação entre a massa total de sólidos retidos pela altura da camada filtrante (TR_{cm}) para as diferentes combinações entre modelos de placa difusora, alturas da camada filtrante e taxas de filtração. O objetivo de ponderar a massa total de sólidos retidos pela altura da camada filtrante é obter outro parâmetro para avaliar a capacidade que cada unidade de altura da camada de areia tem de reter sólidos.

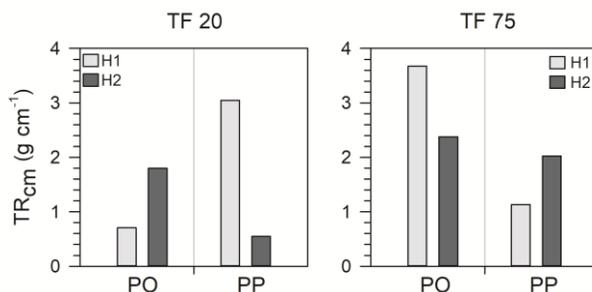


Figura 10 – Comportamento da massa total de sólidos retidos pela altura de camada filtrante (TR_{cm} – g cm⁻¹), para as diferentes combinações entre modelos de placa difusora, alturas de camada filtrante, e taxas de filtração.

Na taxa de filtração TF20 a placa difusora proposta apresentou a maior retenção de sólidos no uso da altura H1. Considerando a placa original, o maior valor ocorreu no uso da altura de camada H2. Já em TF75, observou-se inversão do comportamento, com a placa PO apresentando melhor resultado no uso da altura H1, e a placa PP no uso da altura H2.

Na Tabela 6 é apresentado o resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de massa total de sólidos retidos ponderado pela altura da camada filtrante, para as diferentes combinações experimentais.

Tabela 6 – Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de massa total de sólidos retidos ponderado pela altura da camada filtrante (g cm^{-1}) para as diferentes combinações entre modelos de placa difusora e alturas de camada filtrante¹.

| Taxa de filtração | Placa difusora | H1 | H2 |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| TF20 | Original | 0.71 ± 0.25 bB | 1.8 ± 0.18 aA |
| | Proposta | 3.05 ± 0.53 aA | 0.55 ± 0.23 bB |
| TF75 | Original | 3.68 ± 1.3 aA | 2.38 ± 0.6 aA |
| | Proposta | 1.13 ± 0.46 bA | 2.02 ± 0.54 aA |

¹letras minúsculas diferentes na vertical, e letras maiúsculas diferentes na horizontal, diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança do modelo de placa difusora e da altura da camada filtrante respectivamente.

No uso da taxa TF75 o aumento da altura da camada filtrante não alterou significativamente a retenção de sólidos para ambas as placas difusoras. Contudo, no uso da menor taxa (TF20), o incremento da altura da camada filtrante aumentou a retenção de sólidos no uso da placa original, porém reduziu a retenção de sólidos no uso da placa proposta.

Com relação à influência do modelo de placa difusora, o único tratamento que não determinou diferença significativa foi TF75H2. Nos tratamentos TF20H2 e TF75H1 a placa original apresentou melhor desempenho, e o tratamento TF20H1 o uso da placa proposta atingiu os maiores valores de retenção de sólidos por unidade de comprimento da camada filtrante.

3.3 Distribuição radial da retenção de sólidos na superfície do leito filtrante

Na Figura 11 está apresentado a distribuição radial da massa de sólidos retidos na superfície de cada anel circular avaliado, para as diferentes combinações experimentais. O objetivo foi avaliar a influência das variáveis na distribuição dos sólidos na superfície da camada filtrante.

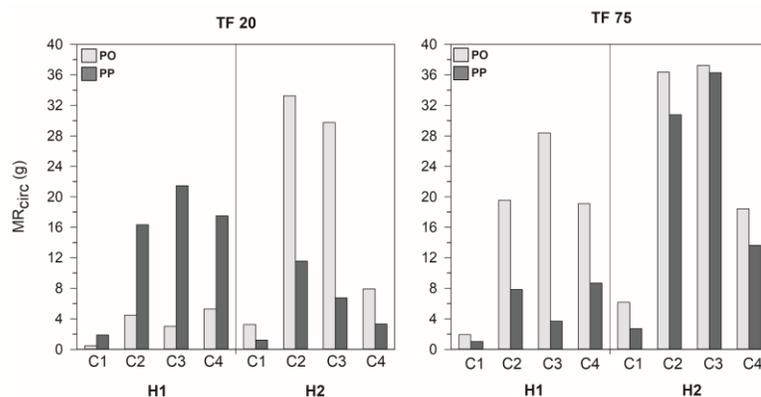


Figura 11 - Massa de sólidos retidos na superfície de cada anel circular (C1 - centro, C2, C3 e C4 – anel circular da extremidade) para as diferentes combinações entre modelos de placa difusora, alturas de camada filtrante, e taxa de filtração.

Em todas as combinações os acúmulos de sólidos ocorreram majoritariamente nos pontos circulares C2, C3 e C4, indicando que ambas as placas difusoras apresentaram baixa capacidade de transportar os sólidos para o ponto C1 (ponto centralizado abaixo da placa difusora).

Analisando a influência da altura da camada filtrante, observou-se que no uso da taxa TF20 associado à placa proposta, o aumento da altura da camada filtrante diminuiu a massa de sólidos retidos na superfície, apesar de manter o mesmo padrão de distribuição na superfície. Observou-se comportamento oposto no uso da placa original. Para a taxa TF75, tanto no uso da placa original quanto a placa proposta, observou-se aumento da massa de sólidos retidos na superfície com o incremento da altura de camada filtrante, com o mesmo comportamento de distribuição.

Com relação à influência do modelo de placa difusora, observou-se que apenas no tratamento TF20 H1 a placa difusora proposta apresentou os maiores valores de massa de sólidos retidos na superfície. Nos demais tratamentos a placa original apresentou os maiores valores.

Nas Tabelas 7 e 8 é apresentado o resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) referente aos dados de massa de sólidos retidos na superfície da camada filtrante, analisando respectivamente a influência combinada da altura da camada filtrante e da localização do anel circular, bem como do modelo de placa difusora.

Tabela 7 – Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para as médias de massa total de sólidos retidos na superfície da camada filtrante, considerando a influência da altura da camada filtrante e da localização do anel circular.

| Taxa de filtração | Placa difusora | Altura da camada filtrante | Localização do anel circular | | | |
|-------------------|----------------|----------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | | | C1 | C2 | C3 | C4 |
| TF20 | Original | H1 | 0.46 ± 0.49 aA | 4.50 ± 3.78 bA | 3.02 ± 2.14 bA | 5.29 ± 2.38 aA |
| | | H2 | 3.26 ± 1.16 aB | 33.25 ± 0.16 aA | 29.76 ± 4.09 aA | 7.91 ± 2.41 aB |
| | Proposta | H1 | 1.87 ± 0.55 aB | 16.35 ± 5.47 aA | 21.45 ± 5.37 aA | 17.50 ± 1.70 aA |
| | | H2 | 1.20 ± 0.17 aC | 11.54 ± 4.08 aA | 6.72 ± 6.44 bB | 3.32 ± 4.69 bB |
| TF75 | Original | H1 | 1.92 ± 0.20 aC | 19.56 ± 7.47 bA | 28.40 ± 7.80 aA | 19.09 ± 9.71 aB |
| | | H2 | 6.17 ± 3.36 aB | 36.35 ± 11.64 aA | 37.24 ± 7.04 aA | 18.43 ± 6.09 aB |
| | Proposta | H1 | 1.01 ± 0.64 aA | 7.83 ± 3.56 bA | 3.68 ± 1.88 bA | 8.68 ± 3.20 aA |
| | | H2 | 2.69 ± 0.93 aD | 30.78 ± 11.92 aB | 36.31 ± 6.32 aA | 13.63 ± 4.43 aC |

¹letras minúsculas diferentes na vertical, e letras maiúsculas diferentes na horizontal, diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança da altura da camada filtrante e da localização do anel circular respectivamente.

Tabela 8 - Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para as médias de massa total de sólidos retidos na superfície da camada filtrante, considerando a influência do modelo de placa difusora.

| Taxa de filtração | Altura da camada filtrante | Modelo de placa difusora | Localização do anel circular | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | | | C1 | C2 | C3 | C4 |
| TF20 | H1 | Original | 0.46 ± 0.49 aA | 4.5 ± 3.78 bA | 3.02 ± 2.14 bA | 5.29 ± 2.38 aA |
| | | Proposta | 1.87 ± 0.55 aB | 16.35 ± 5.47 aA | 21.45 ± 5.37 aA | 17.5 ± 1.7 aA |
| | H2 | Original | 3.26 ± 1.16 aB | 33.25 ± 0.16 aA | 29.76 ± 4.09 aA | 7.91 ± 2.41 aB |
| | | Proposta | 1.2 ± 0.17 aC | 11.54 ± 4.08 aA | 6.72 ± 6.44 bB | 3.32 ± 4.69 bB |
| TF75 | H1 | Original | 1.92 ± 0.2 aC | 19.56 ± 7.47 bA | 28.4 ± 7.8 aA | 19.09 ± 9.71 aB |
| | | Proposta | 1.01 ± 0.64 aA | 7.83 ± 3.56 bA | 3.68 ± 1.88 bA | 8.68 ± 3.2 aA |
| | H2 | Original | 6.17 ± 3.36 aB | 36.35 ± 11.64 aA | 37.24 ± 7.04 aA | 18.43 ± 6.09 aB |
| | | Proposta | 2.69 ± 0.93 aD | 30.78 ± 11.92 aB | 36.31 ± 6.32 aA | 13.63 ± 4.43 aC |

¹letras minúsculas diferentes na vertical diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança da localização na camada filtrante.

Analisando a diferença de retenção de sólidos nas diferentes localizações da superfície, observou-se tendência de aumento da diferença entre os pontos com o incremento da altura da camada filtrante (superfície da camada mais próxima à placa difusora). Esse aumento foi intensificado no uso da maior taxa de filtração (TF75). Essa ocorrência está em consonância com Mesquita et al. (2019a) que mencionam a necessidade de região livre abaixo da placa difusora com o intuito de homogeneizar as linhas de fluxo, sendo necessária aumentar a distância entre a placa

difusora e a superfície do leito filtrante com o incremento da taxa de filtração.

Com relação à influência da altura da camada filtrante, não foram todas as localizações que se observou diferenciação estatística, contudo, nos tratamentos que apresentaram significância o aumento da altura da camada filtrante determinou incremento da retenção de sólidos retidos.

Com exceção do tratamento TF20 H1 onde placa proposta apresentou maior retenção de sólidos, nas demais onde observou-se significância a placa difusora original apresentou os melhores resultados.

3.5 Eficiência de remoção do processo de filtração

Na Figura 12 é apresentado o comportamento da eficiência de remoção do processo de filtração do do filtro de areia (Efr) tanto pela análise da água, quanto pela análise da areia, para as diferentes combinações experimentais.

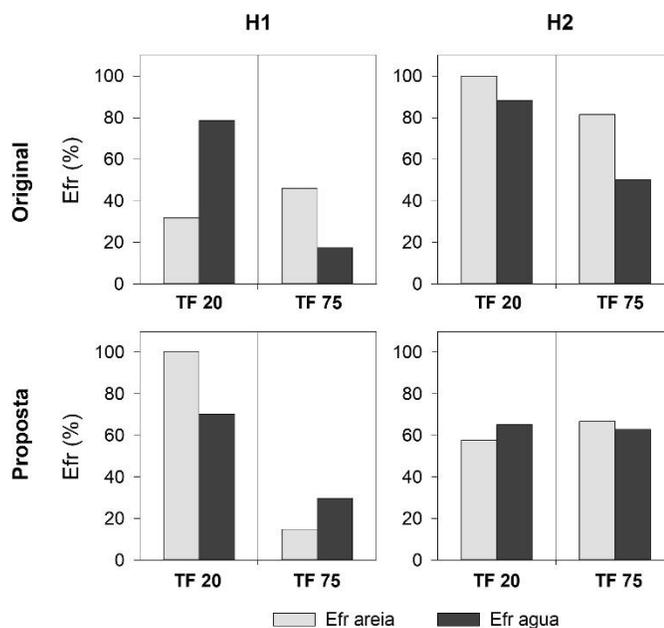


Figura 12 – Comportamento da eficiência de remoção do processo de filtração do filtro de areia com base na água (método padrão) e com base na areia, para as combinações entre modelos de placa difusora, taxas de filtração, e altura da camada filtrante.

Nas Tabela 9 e 10 estão apresentados os resultados do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para os dados de eficiência de remoção do processo de filtração para as diferentes combinações experimentais.

Tabela 9 – Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para as médias de eficiência de remoção do processo de filtração do filtro de areia com base na análise da areia e da água, analisando a influência combinada dos modelos de placa difusora e da altura de camada filtrante¹.

| Taxa de filtração | Altura de camada filtrante | Análise pela areia | | Análise pela água | |
|-------------------|----------------------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | | Placa Original | Placa Proposta | Placa Original | Placa Proposta |
| 20 | H1 | 31.89 ± 2.58 bB | 100.00 ± 0.01 aA | 78.53 ± 2.87 aA | 70.26 ± 18.37 aA |
| | H2 | 100.00 ± 0.01 aA | 57.40 ± 33.3 bB | 88.26 ± 2.60 aA | 65.15 ± 7.62 aA |
| 75 | H1 | 46.01 ± 8.03 bA | 14.65 ± 6.80 bB | 17.45 ± 10.42 bA | 29.72 ± 8.93 bA |
| | H2 | 81.56 ± 19.99 aA | 66.63 ± 24.96 aA | 50.01 ± 15.16 aA | 62.83 ± 9.65 aA |

¹letras minúsculas diferentes na vertical, e letras maiúsculas diferentes na horizontal, diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança da altura da camada filtrante e do modelo de placa difusora respectivamente.

Tabela 10 – Resumo do resultado do teste Tukey ($P \leq 0.05$) para as médias de eficiência de remoção do processo de filtração do filtro de areia com base na análise da areia e da água, para as diferentes combinações de taxa de filtração e formas de realização da análise¹.

| Altura de camada filtrante | Taxa de filtração | Placa Original | | Placa Proposta | |
|----------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | | Análise pela Areia | Análise pela Água | Análise pela Areia | Análise pela Água |
| H1 | TF20 | 31.89 ± 2.58 bB | 78.53 ± 2.87 aA | 100.00 ± 0.01 aA | 70.26 ± 18.37 aA |
| | TF75 | 46.01 ± 8.03 bA | 14.65 ± 10.42 bA | 14.65 ± 6.80 bB | 29.72 ± 8.93 bA |
| H2 | TF20 | 100.00 ± 0.01 aA | 88.26 ± 2.60 aA | 57.40 ± 33.3 bB | 65.15 ± 7.62 aA |
| | TF75 | 81.56 ± 19.99 aA | 50.01 ± 15.16 aA | 66.63 ± 24.96 aA | 62.83 ± 9.65 aA |

¹letras minúsculas diferentes na vertical, e letras maiúsculas diferentes na horizontal, diferem significativamente ($P \leq 0.05$) com a mudança da taxa de filtração e da forma de realização da análise respectivamente.

Com base na análise realizada na areia, os maiores valores de eficiência de remoção ocorreram em TF20H1PP e TF20H2PO, ambas com valores de 100% (Tabela 9). O incremento da altura da camada filtrante, no uso da taxa TF20, determinou incremento de EFr para PO e redução para PP. Já no uso da taxa TF75, houve aumento significativo de EFr com o aumento da altura da camada filtrante apenas no uso da placa PP.

O incremento da taxa de filtração reduziu significativamente EFr no uso da placa difusora "proposta" (Tabela 10). Essa observação diverge de Mesquita et al. (2019b), que observaram que o incremento da taxa de filtração aumentou a eficiência de remoção. Outra diferença observada foi a magnitude nos valores, onde os autores encontraram maior valor em torno de 12.64% pela análise dos sólidos retidos na areia. A diferença entre os trabalhos está na forma de realização das amostras, onde no presente trabalho pretendeu-se melhorar a representatividade da amostragem.

Com base na análise dos sólidos realizados pela água (método padrão), no uso da taxa TF75 houve aumento da eficiência de remoção com o incremento da altura da camada filtrante para os dois modelos de placa difusora, não havendo diferenças significativas entre as placas (Tabela 9). Ao se analisar as alturas de camada de areia variando-se a taxa de filtração (Tabela 10), encontrou-se diferenças em H1PO, H1PP e H2PO, onde o incremento de TF resultou em redução de Efr, apresentando comportamento semelhante com a base na análise realizada pela areia.

Os maiores acúmulos de sólidos em TF20 concordam com as maiores eficiências, ocorrendo nos mesmos tratamentos. Já os maiores acúmulos em TF75 não representaram as maiores eficiências. Apesar das maiores taxas de filtração (TF75) determinar maior massa de entrada de sólidos no filtro, possivelmente devido a maior velocidade intersticial da água, pode ter resultado em aumento do desprendimento de partículas como salienta di Bernardo (2003), reduzindo a eficiência de remoção no processo.

Comparando-se os métodos de estimativa (análise com base na areia, e com base na água), houve diferença em POH1TF20, com análise baseada na água sendo maior, e em POH2TF75 e PPH1TF20 com análise com base na areia sendo maior. De maneira geral 62.5% dos resultados apresentaram igualdade, indicando convergência entre os métodos, e divergindo das observações de Mesquita et al. (2019b). A convergência entre as metodologias de análise pode ter ocorrido em função da forma que foram realizadas as amostragens de água no decorrer do experimento (amostra composta oriunda de coletas a cada 10 minutos), uma vez que a metodologia ASABE (2008) preconiza a coleta de apenas uma amostra.

De maneira geral o aumento da altura da camada filtrante resultou em maiores eficiências, apesar da maior eficiência de remoção ter ocorrido no uso da combinação TF20H1PP. Adicionalmente observou-se que a placa difusora pode ser desenvolvida com o intuito de se utilizar menores alturas de camada filtrante, podendo reduzir o impacto no custo de construção do equipamento, e no custo energético do processo.

3.6 Deformação da superfície da camada filtrante

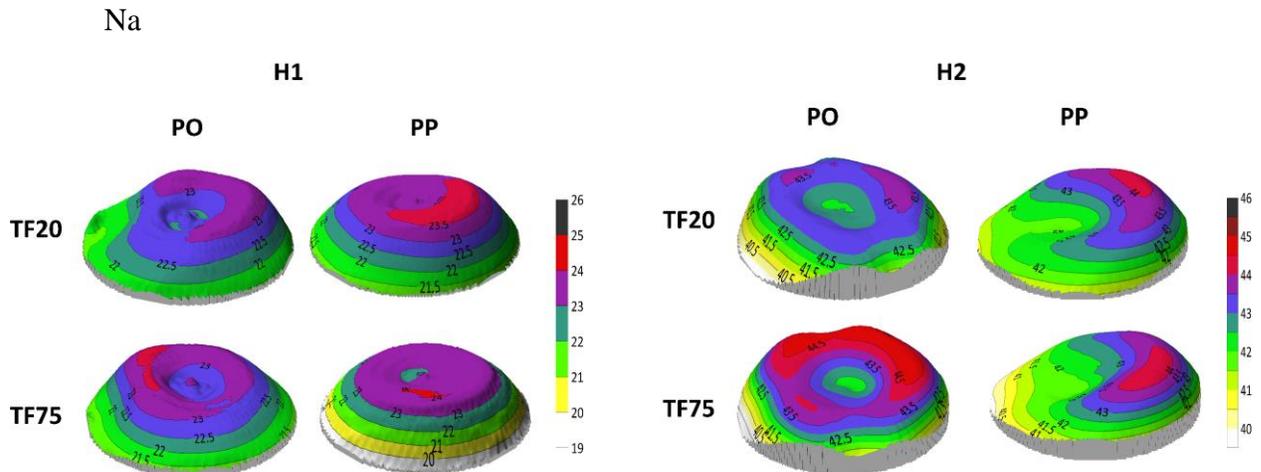


Figura 13 é apresentado o comportamento da deformação da superfície da camada filtrante após o processo de filtração.

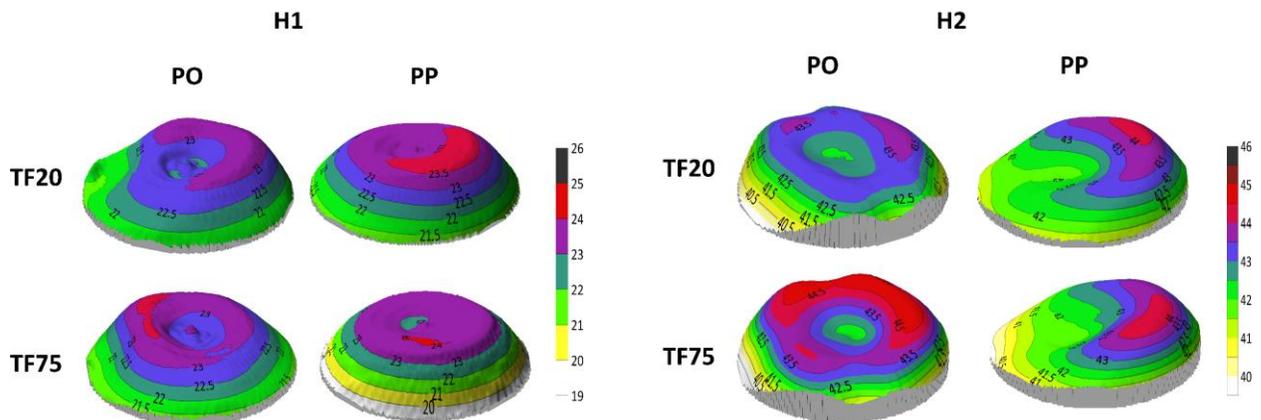


Figura 13 - Comportamento da deformação da superfície da camada filtrante após o processo de filtração para as diferentes combinações entre modelos de placa difusora, alturas da camada filtrante, e taxas de filtração.

É possível observar que a superfície da camada filtrante apresenta comportamentos distintos quando se compara as duas alturas, excetuando-se que em todos os casos houve aprofundamento da lateral, na região do anel C4. No uso da altura H1 há uma tendência da superfície apresentar o formato de tronco de cone, e com aumento da taxa de filtração não apresentar variações aparentes. A placa difusora PO (original) apresentou uma depressão central mais acentuada, com maiores acúmulos na região do anel C2. Já a placa PP (proposta) mostrou-se mais uniforme na região central

No uso da altura H2 a superfície da camada apresentou características diferentes para as duas placas difusoras, onde para placa PO (original) formou-se uma coroa mais definida, com sua ocorrência na região compreendida pelos anéis 2 e 3, onde com o incremento da taxa de filtração observou-se a ocorrência de maiores picos (cor vermelha). Já para a placa difusora PP (proposta) o comportamento apresentou semelhança entre as duas taxas de filtração avaliadas, havendo uma rampa ascendente com o anel 3 apresentando picos elevados e baixos.

A fim de se compreender a influência que o comportamento da camada superficial causa na retenção de sólidos, é apresentado na Figura 14 o resultado da retenção dos sólidos suspensos contidos na areia, tanto na superfície como em profundidade, o qual devido a quantidade de fatores e complexidade da análise estatística a avaliação será feita graficamente.

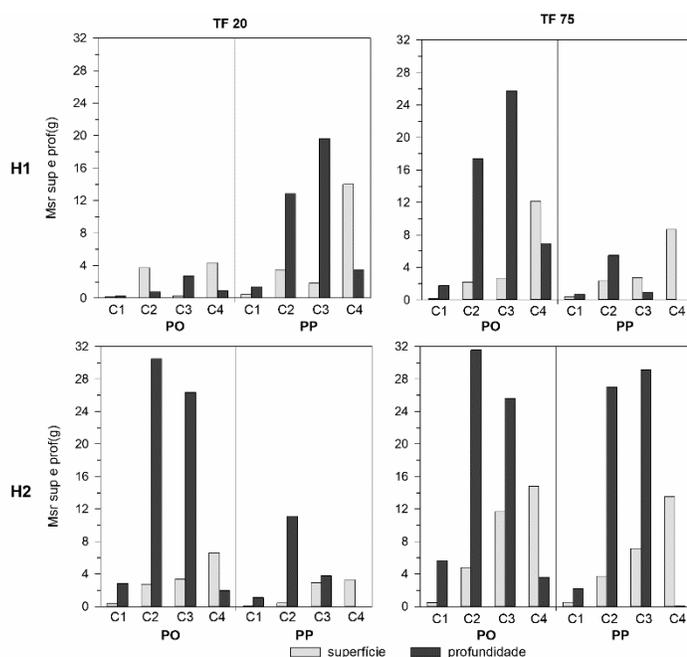


Figura 14 – Comportamento da retenção da massa de sólidos na superfície e em profundidade para as diferentes localizações dos anéis circulares (C1, C2, C3 e C4).

Observa-se que a retenção de massa de sólidos apresentaram comportamento semelhante para TF20H1PP, T20H2PO, TF75H1PO, TF75H2PO e TF75H2PP, tanto na superfície como em profundidade, havendo a tendência de maiores acúmulos de sólidos em profundidade nos pontos circulares C2 e C3, havendo redução em C4. Já na superfície há a tendência do aumento da massa de sólidos retidos no sentido de C1 para C4, onde nesses casos a placa difusora proposta apresentou valores próximos de zero no ponto circular C4.

Segundo di Bernardo (2003) a contaminação do meio filtrante ocorre camada por camada, onde na camada superior ocorre a saturação por acúmulo de sólidos, sendo estes desprendidos, acumulando-se nas camadas inferiores. O comportamento observado na

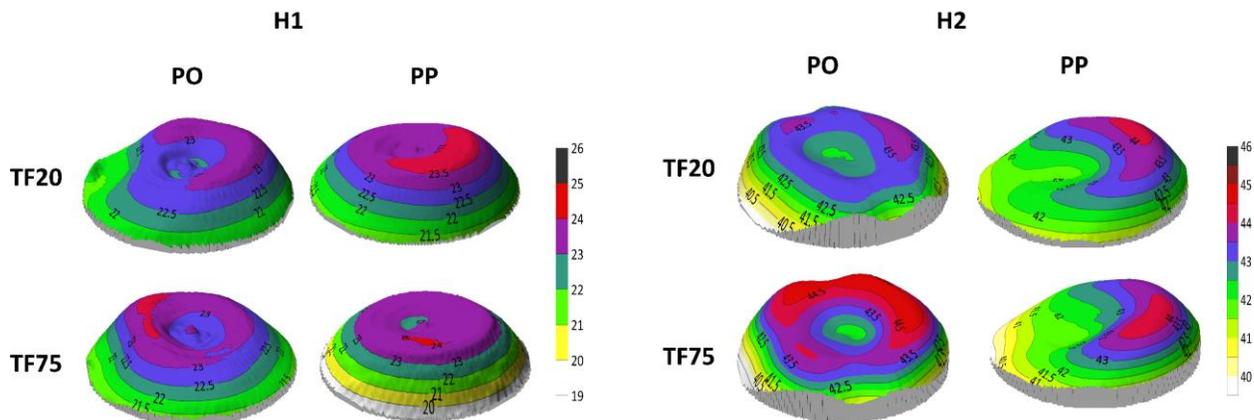


Figura 13 mostra que há um revolvimento da areia nas regiões próximas da parede do filtro devido ao movimento dos vórtices (Pujos, et al., 2022, Mesquita et al., 2019a), resultando em acúmulos nas regiões circulares C2 e C3, sendo os sólidos suspensos transportados para essas regiões, havendo acúmulos de areia e de sólidos suspensos, havendo maior concentração de sólidos tanto em superfície como em profundidade (Figura 14).

A partir dos comportamentos da superfície da camada filtrante, bem como dos resultados de acúmulo de sólidos no filtro de areia, pode-se afirmar que as linhas de fluxo resultantes do modelo construtivo de placa difusora causa um efeito na distribuição e redistribuição dos sólidos no filtro de areia, onde a adaptação da placa difusora a outro filtro de areia leva a resultados não esperados, havendo redução do uso efetivo da camada de areia.

4 Conclusões

Constatou-se influência significativa do modelo de placa difusora na remoção sólidos suspensos totais, demonstrando a necessidade de desenvolvimento associando à altura da camada filtrante e à taxa de filtração. O correto desenvolvimento do filtro de areia poderá resultar em um produto com necessidade de utilizar menores alturas de camada filtrante, tendo como consequência maior economia na produção e menores gastos energéticos no processo.

Adicionalmente o método de avaliação da eficiência de remoção utilizando informações de remoção pela areia, e método padrão, apresentaram convergência em seus resultados, onde modificações na coleta das amostras de água pelo método padrão (amostra compostas com coletas

no decorrer do tempo de filtração) podem levar à redução da variabilidade temporal da qualidade da água, obtendo-se resultados mais satisfatórios e confiáveis.

5 Referências Bibliografia

Arbat, G., Pujol, T., Puig-Barguês, J., Duran-Ros, M., Barragan, J., & Montoro, L., et al. (2011). Using computational fluid dynamics to predict head losses in the auxiliary elements of a microirrigation sand filter. *Transactions of the ASABE*, 54(4), 1367e1376. <https://doi.org/10.13031/2013.39038>

ASABE. S539. (2008). Media filters for irrigation - Testing and performance reporting. St. Joseph, MI: ASABE Standards.

American Public Health Association, & American Water Works Association. (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. In *Standard methods for the examination of water and wastewater* (pp. 1000-1000).

Burt, C. M. (2010). Hydraulics of commercial sand media filter tanks used for agricultural drip irrigation. Technical Report N. R10-001. Irrigation Training and Research Center (ITRC) (p. 2010). Available in: <http://www.itrc.org/reports/mediafilters.htm>. Access in: 09 may. 2022.

de Deus, F. P., Testezlaf, R., & Mesquita, M. (2013). Efeito das dimensões da placa difusora no comportamento hidráulico de um modelo comercial de filtro de areia. *Engenharia Agrícola*, 33(3), 560-568. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000300012>.

de Deus, F. P., Testezlaf, R., Mesquita, M. (2015). Eficiência de filtros de areia pressurizados na remoção de diferentes tamanhos de partículas da água de irrigação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, V.50, n.10, p.939-948. doi: 10.1590/S0100-204X2015001000010

de Deus, F. P., Testezlaf, R., Mesquita, M. (2016). Assessment methodology of backwash in pressurized sand filters. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)*, v. 20, p. 600-605. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p600-605>.

Frizzone, J. A., Freitas, P. S. L. D., Rezende, R., & Faria, M. A. D. (2012). Microirrigação: gotejamento e microaspersão. (1 ed.). Maringá: Eduem.

Mesquita, M., Testezlaf, R., & Salcedo Ramirez, J. C. (2012). The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. *Agricultural Water Management*, 115, p. 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.09.003>.

Mesquita, M., Testelaf, R., de Deus, F. P., Rosa, L. M. (2017). Characterization of Flow Lines Generated by Pressurized Sand Filter Underdrains. *Chemical Engineering Transactions*, v. 58, p. 715-720. <https://doi.org/10.3303/CET1758120>.

Mesquita, M., de Deus, F. P., Testezlaf, R., Rosa, L. M., & Diotto, A. V. (2019a). Design and hydrodynamic performance testing of a new pressure sand filter diffuser plate using numerical simulation. *Biosystems Engineering*, 183, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.015>.

Mesquita, M., De Deus, F. P., Testezlaf, R., & Diotto, A. V. (2019b). Removal efficiency by pressurized sand filters during the filtration process. *Desalination Water Treatment*, 161, 132e143. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24285>.

Nakayama, F. S., & Bucks, D. A. (1981). Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. *Transactions of the ASAE*, 24(1): 0077-0080. <https://doi: 10.13031/2013.34203>.

Nakayama, F. S., & Bucks, D. A. (1991). Water quality in drip/trickle irrigation: a review. *Irrigation science*, 12(4), 187-192. <https://doi.org/10.1007/BF00190522>

Pizarro Cabello, F. (1996). Riegos localizados de Alta Frecuencia. (3rd ed.). Madri: Mundi Prensa.

Pujol, T., Puig-Bargués, J., Arbat, G., Chaves., Duran-Ros, M., Pujol, J., Cartagena, F. R. (2022). Nuremical study of the hydraulic Effects of modifying the outlet pipe and diffuser plate in pressurized sand filters with wand-type underdrains. *Journal of the ASABE*, 65(3), 609-619. <https://doi.org/10.13031/ja.14710>.

Salcedo, J. C., Testezlaf, R., Mesquita, M. (2011). Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. *Engenharia Agrícola (Impresso)* , v. 31, p. 1226-1237. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000600020>

Standen, S.V., Haarhoff, J. (2004). The use of filter to determine filter cleanliness. *Phys. Chem. Earth*, 36, 1135-1140. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.067>

Testezlaf, R. (2008). Filtros de areia aplicados a irrigação localizada: Teoria e prática. *Engenharia Agrícola*, 28(3), 604e613. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000300020>.

Testezlaf, R., de Deus, F. P., & Mesquita, M. (2014). Filtros de areia na irrigação localizada. *Campinas (SP): Unicamp* (p. 56).

Considerações Finais

O presente trabalho mostrou que o modelo construtivo de placa difusora causa influência no comportamento hidráulico, na distribuição espacial dos sólidos retidos e na eficiência de remoção do processo de filtração em filtros de areia. Esperava-se que a placa difusora proposta apresentasse comportamento superior à placa difusora original no que tange à eficiência de remoção do filtro de areia, porém verifica-se que a adaptação da placa difusora à outro filtro pode levar a resultados não esperados. Apesar da divergência de resultados, fica claro que ao se projetar uma placa difusora deve-se levar em o diâmetro do filtro, a altura da camada filtrante, a distância da placa difusora à superfície da camada filtrante, e as condições de operação.

Ao longo das realizações da parte experimental da pesquisa, verificou-se ocorrências que podem causar influência nos resultados, levando às seguintes observações e recomendações:

- O espaço disponível entre a base da placa difusora e a tubulação da entrada da água pode causar influência no comportamento hidráulico do filtro de areia, no revolvimento da superfície da camada filtrante, e na retenção de sólidos retidos. Sendo assim, a variação da altura de instalação da placa difusora pode ser objetivo de estudo em trabalhos futuros.

- As bombas hidráulicas tem seu ponto de operação modificado quando se varia a vazão do sistema. Sendo assim, ao se variar a taxa de filtração do filtro de areia varia-se a carga de pressão recebida pelo filtro, o que pode influenciar no comportamento da retenção de sólidos na camada filtrante. Desta forma, recomenda-se a utilização de uma válvula reguladora de pressão para se manter as mesmas condições de pressão interna no filtro de areia.